

$$E = \boxed{h\nu_0 \equiv m_0 c^2} = E$$

1900

1923

1905

**А.Ф. СМЫК**

# **ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**



**монография**

УДК 530.145  
ББК 22.314  
С 524

Рецензенты:  
д-р техн. наук, проф. Т.Г. Самхарадзе,  
канд. физ.-мат. наук, доцент Н.В. Самсоненко.

Предисловие д-ра физ.-мат. наук, проф. Л.И. Уруцкоева

**Смык, А.Ф.**  
С 524 От волн де Бройля к квантовой механике: монография / А.Ф.  
Смык. - М.: МАДИ, 2013. - 232 с.

УДК 530.145  
ББК 22.314

© МАДИ, 2013

Научное издание

**СМЫК** Александра Федоровна

ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ  
К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

монография

*Редактор* В.В. Виноградова

Подписано в печать 19.04.2013 г. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 11,6. Тираж 50 экз. Заказ .  
Ротапринт МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64.

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(МАДИ)

А.Ф. СМЫК

ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ  
К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

монография

МОСКВА  
МАДИ  
2013

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)



А.Ф. СМЫК

**ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ  
К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ**

МОНОГРАФИЯ

Проректор по научной работе

Иванов А.М.

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(МАДИ)

А.Ф. СМЫК

ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ  
К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

монография

МОСКВА  
МАДИ  
2013

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	5
Введение .....	6
<b>Глава 1. Период формирования личности</b>	
и определения научных интересов Л. де Бройля .....	11
1.1. Происхождение, образование, «семейная наука».....	11
1.2. «Я работал в глубоком одиночестве» .....	24
1.3. Влияние французской научной мысли на мировоззрение Л. де Бройля .....	30
<b>Глава 2. Генезис корпускулярно-волнового дуализма материи .....</b>	
2.1. Три статьи Л. де Бройля в «Докладах Французской Академии наук» 1923 г. ....	39
2.2. Проблема корпускулярно-волнового дуализма света .....	45
2.3. Эмпирические результаты по исследованию природы света .....	50
2.4. Зарождение квантовой теории света .....	54
2.5. Экспериментальные исследования X-лучей 1921-1923 гг. и попытки создания квантовой теории.....	65
2.6. О влиянии А. Эйнштейна и А. Пуанкаре на Л. де Бройля.....	70
2.7. Проблемы излучения, обсуждавшиеся на Первом Сольвеевском конгрессе .....	77
2.8. «Долгое и далеко идущее размышление»: оптико-механическая аналогия.....	82
2.9. Схема генезиса идеи корпускулярно-волнового дуализма .....	89
<b>Глава 3. Знаменитая и неизвестная диссертация Л. де Бройля .....</b>	
3.1. «Он поднял угол великого занавеса»: восприятие диссертации.....	91
3.2. Анализ диссертации.....	94
3.2.1 Обоснование выдвигаемых идей .....	94
3.2.2. Релятивистские фазовые волны.....	97
3.2.3. Закон фазовой гармонии .....	99
3.2.4. Волновые пакеты и групповая скорость .....	102
3.2.5. Задачи, решенные с помощью фазовых волн .....	105
3.2.6. Выводы и заключения диссертации.....	115
<b>Глава 4. Волновая механика Шредингера и экспериментальное             подтверждение идей де Бройля и Шредингера.....</b>	
	118

4.1. О влиянии Л. де Бройля на А. Эйнштейна .....	118
4.2. О влиянии Л. де Бройля на Э. Шредингера .....	122
4.3. Экспериментальное подтверждение волн де Бройля.....	132
<b>Глава 5. Проблемы физической интерпретации квантовой механики в работах де Бройля 1923-1927 гг.....</b>	<b>143</b>
5.1. Теория двойного решения: статья «Корпускулярная структура вещества и излучения и волновая механика» 1927 г.....	143
5.2. Доклад де Бройля «Новая динамика кванта» на Пятом Сольвеевском конгрессе 1927 г.....	150
5.3. Дискуссия по докладу Л. де Бройля .....	157
5.4. Значение и затруднения теории двойного решения .....	160
5.5. Эволюция детерминизма в работах Л. де Бройля.....	163
<b>Глава 6. Вклад Л. де Бройля в преподавание волновой механики.....</b>	<b>168</b>
6.1. Преподавание в Институте Анри Пуанкаре .....	168
6.2. Семинар в Институте Анри Пуанкаре и создание научной школы .....	174
<b>Глава 7. Восприятие идей Л. де Бройля в СССР .....</b>	<b>180</b>
7.1. Восприятие идей де Бройля и Шредингера мировым научным сообществом и в СССР .....	180
7.2. Публикации Л. де Бройля и о нем в УФН 1924 - 1988 гг. ....	186
7.3. Переводы и публикации работ Л. де Бройля в СССР .....	189
<b>Заключение.....</b>	<b>191</b>
<b>Приложение 1. Отзыв на диссертацию де Бройля П.Ланжевена и Ж. Перрена на французском языке и его перевод на русский .....</b>	<b>195</b>
<b>Приложение 2. Библиография публикаций Л. де Бройля на русском языке .....</b>	<b>201</b>
<b>Приложение 3. Библиография трудов Л. де Бройля.....</b>	<b>202</b>
<b>Приложение 4. Хронология истории создания квантовой механики.....</b>	<b>215</b>
<b>Приложение 5. Хронология жизни Л. де Бройля .....</b>	<b>217</b>
<b>Литература .....</b>	<b>219</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основные представления квантовой механики были сформулированы в середине 20-х годов XX столетия. Истории создания квантовой механики посвящено большое количество монографий, принадлежащих как перу непосредственных создателей квантовой механики, так и многочисленным исследователям истории создания этого, безусловно, одного из интереснейших этапов развития представлений современной физики. Наиболее яркие монографии зарубежных авторов, посвященные исследованию этого вопроса, переведены на русский язык. Гораздо скромнее в истории физики освещена тема создания волновой механики, являющейся предтечей квантовой механики.

История создания волновой механики неразрывно связана с именем Луи де Брайля. Следует отметить, что до настоящего дня в отечественной историко-научной литературе отсутствовали детальные исследования, посвященные анализу генезиса основных представлений волновой механики. Как правило, учебники по квантовой механике содержат упоминание о Луи де Брайле как об авторе гипотезы, приписывающей микрочастице волновые свойства. О том, что эта «гипотеза» не была введена де Брайлем в физику *ad hoc*, а на самом деле явились логическим следствием развития синтеза представлений классической физики и квантовых свойств излучения, практически нигде не упоминается. Очень сложно также найти последовательный анализ того, насколько непростым и тернистым был путь автора к кажущейся сегодня совсем очевидной мысли о волновых свойствах микрочастиц. Несмотря на то, что сегодня квантовая механика стала не менее «хрестоматийной», чем курс «Сопротивление материалов», ученые до сих пор исследуют возможности альтернативного подхода к описанию микромира. С этой точки зрения, монография А.Ф. Смык «От волн де Брайля к квантовой механике» представляется весьма актуальной.

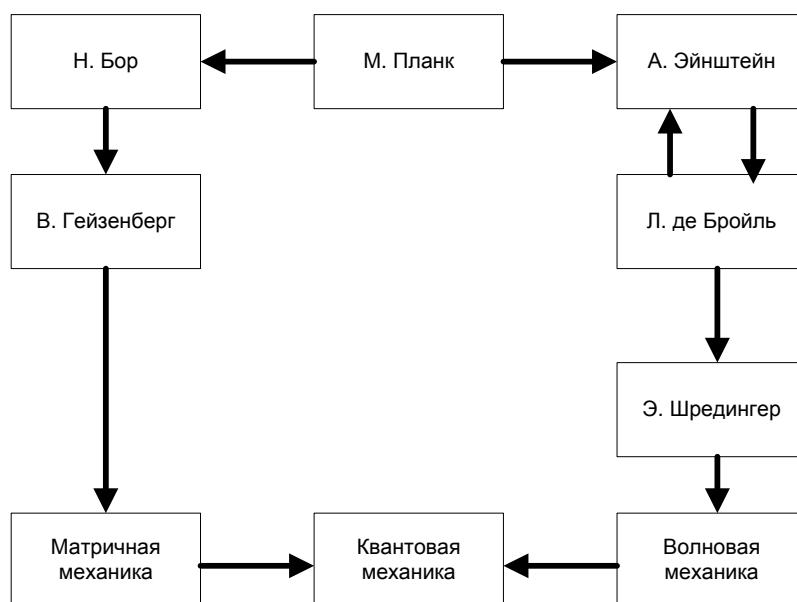
Настоящая монография А.Ф. Смык является первым полномасштабным исследованием научного творчества Луи де Брайля, охватывающим временной период от начала 20-х до конца 30-х годов XX столетия. Монография написана увлекательно, эмоционально, на хорошем литературном языке. Она, несомненно, будет представлять интерес для широкого круга читателей: от студентов-физиков до людей, профессионально занимающихся изучением истории физики.

Л.И. Уруцкоев,  
д-р физ.-мат. наук, профессор

## ВВЕДЕНИЕ

Выдающийся французский физик Луи де Бройль (1892-1987 гг.) заслуженно признан одним из основоположников квантовой механики. Открытие им принципа корпускулярно-волнового дуализма материи является ключевым событием в истории квантовой механики.

Если рассматривать принципы и идеи, лежащие в основании квантовой механики, то мы обязательно придем к именам первооткрывателей или архитекторов квантовой механики, создание которой шло двумя параллельными путями (рис. 1). Первый путь привел к волновой механике, и его связывают с именами Л. де Бройля, Э. Шредингера, предшественником которых является А. Эйнштейн. Второй путь привёл к матричной механике, и его прокладывали В. Гейзенберг, М. Борн, В. Паули. Тождественность волновой и матричной механики впоследствии (1926 г.) была установлена Шредингером, и за новым разделом теоретической физики закрепилось название квантовая механика.



*Рис. 1. Первооткрыватели квантовой механики*

Создание квантовой механики пришлось на первые три десятилетия XX века. Начало ее зарождения положили работы М. Планка по теории излучения абсолютно черного тела, в которых впервые была использована идея кванта действия. В 1905 г. Эйнштейн выдвинул предположение, по своим последствиям не меньшее, чем гипотеза Планка о кванте действия. До работы Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света», понятие квантов считалось применимым лишь к взаимодействию между веществом и излучением. Должен существовать осциллятор с частотой  $v$ , который мог бы испускать или поглощать энергию только частями, кратными  $\hbar v$ . Эйнштейн предложил рассматривать структуру

самого излучения в виде определенных порций – корпускул, световых квантов. Гипотеза или «эвристическая точка зрения» Эйнштейна о световых частицах практически всеми была отвергнута. В последующих своих работах Эйнштейн продолжал отстаивать корпускулярную модель квантов света. Неявно в этих работах содержалась концепция дуализма света, но предложить идею объединения двух точек зрения на природу света Эйнштейн не мог. Требовалась новая теория, объясняющая на одном онтологическом уровне корпускулярные и волновые свойства света.

В самом начале своего научного пути Л. де Бройль оказался вовлеченным в экспериментальные исследования, проводимые на самом высоком техническом уровне в лаборатории его брата М. де Бройля, по изучению как структуры атомов, так и природы рентгеновского излучения. Он проникся проблемами природы излучения, которые многим казались неразрешимыми. Экспериментальные факты подтверждали корпускулярную природу, но при этом существовали и доказательства волновой природы излучения. Л. де Бройль сделал решающий вклад в развитие квантовой теории, придав физический смысл сосуществованию корпускулярной и волновой точек зрения и утверждению корпускулярно-волнового дуализма как фундаментального принципа природы.

Вспоминая историю своего открытия, де Бройль писал, что работы Эйнштейна четко указывали ему путь, которым нужно следовать, чтобы решить сложную проблему сосуществования волн и частиц. Де Бройль считал, что кванты света и частицы материи не являются противоположными сущностями, они едины по своей сути, и должны описываться единым образом. В статьях 1922 г. де Бройль предлагает рассматривать кванты света, которые он называет световыми атомами, как частицы с бесконечно малой массой, движущиеся со скоростями, зависящими от их частоты, очень близкими к скорости света с. Рассматривая газ световых атомов, де Бройль получил закон распределения Планка для абсолютно черного тела, без привлечения электромагнетизма. Далее он предсказывает для световых атомов, движущихся когерентно, возможность объяснения явления интерференции. Первые работы де Бройля появились в условиях, когда сама идея Эйнштейна о квантах света не находила признания, и обращение де Бройля к этой теории свидетельствовало о независимости суждений и самостоятельности мышления молодого физика. Де Бройль продолжал развивать свои смелые и дерзкие идеи, у которых, в отличие от идей Планка и Эйнштейна, не имелось ни одного прямого экспериментального факта. По признанию де Бройля, его одиночество в период 1921-1927 гг. сделало его мысль столь оригинальной. Он представил процесс распространения микрочастицы как осцилли-

рующий «сгусток энергии», приравняв выражения энергии для осциллятора и для фотона, которые до этого никогда вместе не рассматривались:  $\hbar\omega_0 = m_0c^2$ .

В 1923 г. де Бройль в трех небольших по объему статьях обосновал идею нематериальных фазовых волн, ассоциированных с механическим перемещением частицы. Он постулировал существование волны, которую впоследствии назвали волной де Бройля, связанной с движением частицы, обладающей определенными корпускулярными характеристиками – значениями энергии  $E$  и импульса  $\vec{p}$ . Путем рассуждений, основанных на преобразованиях Лоренца, он показал, что частота  $\omega$  и длина  $\lambda$  этой волны связаны с динамическими характеристиками частицы – энергией и импульсом:  $E = \hbar\omega, \vec{p} = \hbar\vec{k}$ . В диссертации, защищенной в 1924 г., де Бройль обобщил свои более ранние идеи и развел новую динамику, заменив принцип инерции Галилея принципом, согласно которому частица следует по одному из лучей фазовой волны. Диссертация де Бройля вызвала положительный отклик Эйнштейна, оказала влияние на самого Эйнштейна при разработке им квантовой теории идеального газа, а также на Шредингера, который развел концепцию фазовой волны и получил нерелятивистское волновое уравнение. Записав фазовую волну де Бройля в виде  $\psi = \psi(x, t)$ , Шредингер показал, что функция  $\psi$  естественным образом связана с неким колебательным процессом в атоме. Уравнение Шредингера стало первым толчком к изучению волновой механики. Первоначальная интерпретация функции  $\psi$  претерпела изменения в ходе развития теории. Впервые представление о волнах, которые не передают энергию или импульс, но определяют вероятность, было дано в теории Н. Бора, Х. Крамерса, Д. Слетера в 1924 г. М. Борн, приняв эту концепцию, предложил в 1926 г. интерпретировать величину  $\psi\psi^*dxdydz$ , где  $\psi^*$  – комплексная величина, сопряженная с  $\psi$ , как вероятность того, что электрон находится в бесконечно малом элементе объема  $dxdydz$ .

Де Бройль также активно участвовал в работе по построению математического аппарата волновой механики. В период 1923-1927 гг. он разрабатывал принципы новой волновой механики, обсуждал возможность согласования электромагнитной теории с волновой механикой, предложил теорию двойного решения, в которой попытался представить совместное существование волн и частиц. Де Бройль в теории двойного решения показал, что уравнения волновой механики всегда допускают два связанных между собой решения: одно с постоянно меняющейся амплитудой, которое описывает статистический аспект движения некоторого облака частиц, другое – содержит сингулярность и представляет частицу, встроенную в волновое движение. Де

Бройль выступил с докладом, в котором предложил упрощенный вариант теории двойного решения, на Пятом Сольвеевском конгрессе по физике, который проходил в Брюсселе в 1927 г. Наравне с ним доклады представили Шредингер и совместно - М. Борн и В. Гейзенберг. Пятый Сольвеевский конгресс проходил под названием «Электроны и фотоны». В историю квантовой механики он вошел как конгресс, на котором были представлены разные точки зрения на проблему дуализма волн и частиц, их существования. Победила Копенгагенская интерпретация квантовой механики, и тем самым поиски последовательной теории атома, начатые на Первом Сольвеевском конгрессе в 1911 г., были завершены. Анализ документов, связанных с Пятым Сольвеевским конгрессом, показывает интерес со стороны ведущих физиков к теории двойного решения де Бройля, но математические трудности, которые осознавал сам де Бройль, не позволили ей конкурировать с вероятностной интерпретацией, предложенной Борном и Гейзенбергом.

Вклад Л. де Бройля в создание квантовой механики получил высокую оценку, в 1929 г. ему была присуждена Нобелевская премия по физике «За открытие волновой природы электрона». Экспериментальные доказательства открытия, сделанного де Бройлем в 1923 г., пришли спустя несколько лет и положили начало новым методам исследования структуры вещества.

История квантовой механики достаточно полно изучена, произведена историческая реконструкция развития физических идей и событий, которые привели к созданию квантовой механики. На этом фоне отмечается отсутствие работ, всесторонне и глубоко исследующих вклад Л. де Бройля. Не выявлен генезис его открытия, не проведён всесторонний анализ докторской диссертации, которая явилась обобщением его первоначальных идей, не выявлены связи и взаимное влияние де Бройля на других основоположников квантовой механики. В открытии де Бройля присутствовали аналогии, интуитивные догадки и озарения, свойственные всем великим открытиям, изменившим наше представление о мире. Особенности личности, образования и мировоззрения Л. де Бройля во многом помогают понять логику его открытия, а также его дальнейшие поиски решений разных физических проблем.

Историко-научный анализ работ де Бройля в период становления квантовой механики выполнен лишь фрагментарно. Достаточно полно исследована лишь роль оптико-механической аналогии в установлении принципа дуализма (Л.С. Полак, 1957 г., 1959 г.; М. Джеммер, 1985 г.). Мало внимания уделено анализу работ де Бройля, которые привели к утверждению волновой механики. Существуют вопросы, связанные с работами де Бройля этого периода, которые недоста-

точно полно рассмотрены. К ним относятся вопросы, связанные с генезисом идеи фазовой волны, рассмотрения волнового пакета фазовых волн, применения фазовой волны к объяснению корпускулярных и волновых явлений, касающихся как излучения, так и вещества. С именем Л. де Бройля в истории квантовой механики связан ряд мифов и неточностей. Опубликование документов, касающихся работ де Бройля, изучение первоисточников позволят восстановить историческую справедливость.

Л. де Бройль вел активную научную и преподавательскую деятельность на протяжении почти всего XX века. Научное наследие Л. де Бройля огромно, он написал более 30 научных книг, в основном это курсы лекций по различным вопросам квантовой механики, много книг, касающихся философии науки, им написаны научные статьи, которые еще ждут своего часа для исследования.

Все это дает основание говорить об актуальности данного исследования для истории квантовой механики.

Появлению этой работы способствовал Леонид Ирбекович Уруцкоев, явившийся ее инициатором и движущей силой коллектива, который он сплотил для работы по изданию «Избранных научных трудов Луи де Бройля» на русском языке. Я благодарна Жоржу Лошаку, ученику Л. де Бройля и президенту Фонда Луи де Бройля, а также Мишель Лошак за удивительную верность Л. де Бройлю и помочь мне. Особая благодарность П.П. Максименкову и П.Н. Силенко за помочь в переводах с французского языка. Я выражаю искреннюю благодарность моему научному консультанту Владимиру Павловичу Визгину за оказанную помочь и проявленное внимание.

## ГЛАВА 1. ПЕРИОД ФОРМИРОВАНИЯ ЛИЧНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАУЧНЫХ ИНТЕРЕСОВ ЛУИ ДЕ БРОЙЛЯ

### 1.1. Происхождение, образование, «семейная наука»

Феномен Луи де Бройля представляет собой сочетание блестящего интеллекта, гениальности, цельности жизни, полностью посвященной физике. Сделав великое открытие и получив мировое признание в молодости (Нобелевская премия, 1929 г.), он продолжал до конца жизни заниматься различными вопросами теоретической физики, преподаванием и популяризацией научных теорий (см. «Хронология жизни Л. де Бройля» в прил. 5). На протяжении многих десятилетий Л. де Бройль занимал высокий общественный пост, являясь непременным секретарем Французской академии наук, вел активную научную жизнь. При этом его имя и труды оставались мало знакомы современникам. Вокруг имени де Бройля после 1930 г. существовало своего рода забвение. Во многом это объясняется его особым местом в истории квантовой механики. А.Б. Кожевников и О.И. Новик приводят статистические данные в своем исследовании [75], которые позволяют говорить о совершенно обособленном положении де Бройля среди сформировавшихся групп авторов, работающих над созданием квантовой механики. Анализируя большой массив публикаций по квантовой механике в период с июля 1925 г. по февраль 1927 г., авторы дали наглядное представление об их распределении по различным направлениям (рис. 2).

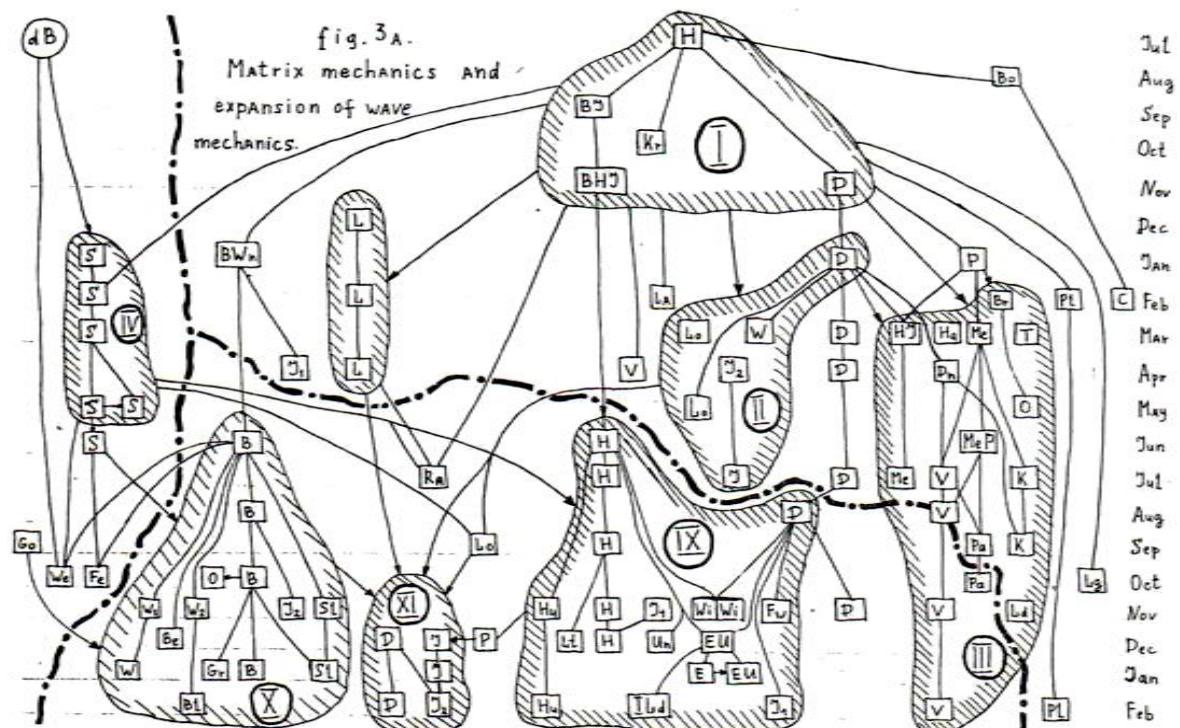


Рис. 2. Распределение публикаций по матричной и волновой механике [75]

Они объединили публикации в группы: I – статьи В. Гейзенберга, М. Борна, П. Йордана, П. Дирака по общим основаниям матричной механики, II – статьи по исследованиям канонических преобразований и различным применением, III – по расчету спектра водорода и двухатомных молекул, IV – статьи Э. Шредингера по общим основаниям волновой механики и т.д. На этом рисунке докторская диссертация Л. де Бройля (обозначена на рис. 2 значком dB), которая лежит вне хронологических рамок исследования, прямым образом или опосредовано связана со многими направлениями в квантовой механике. Линии влияния были построены на основе анализа цитат, содержащихся в статьях этого периода. Линии влияния де Бройля совершенно четкие и для истории квантовой механики представляют несомненный интерес. М. Джеммер назвал выдающимся вклад Л. де Бройля в концептуальное развитие квантовой механики [53, с. 236]. Несмотря на это, вклад де Бройля в создание квантовой механики не получил всестороннего историко-научного анализа.

Глубокое изучение личности де Бройля, среды, в которой он сформировался, и окружения, оказавшего влияние на его научное становление, необходимо для дальнейшего историко-научного анализа его роли в развитии квантовой механики. Во многом открытие де Бройлем корпускулярно-волнового дуализма материи объясняется его особым мышлением. Он обладал интуитивным и образным мышлением, которое порождало новые идеи после продолжительной и мучительной работы над решением проблемы. Ученых, обладающих таким мышлением, существует внутренняя уверенность в правильности этих новых идей еще задолго до строго логического их подтверждения. Достаточно вспомнить слова А. Эйнштейна в письме к М. Гроссману в апреле 1902 г.: «В отношении науки задумано несколько прекрасных идей, но их еще следует высаживать» [5, с. 36]. Проблемы излучения, обсуждавшиеся на первом Сольвеевском конгрессе, привлекли внимание 19-летнего Л. де Бройля. Сначала это было неосознанно, поскольку всей глубины проблем он еще тогда не понимал. И в течение длительного времени, начиная с 1911 г., шла подсознательная внутренняя работа, «долгое размышление», как скажет позже М.-А. Тоннела, которое привело де Бройля к озарению в 1923 г.: всем частицам материи, также как и световым частицам – фотонам, присущи волновые свойства. Все это время шло изучение книг А. Пуанкаре, аналитической механики, теории относительности, работа в экспериментальной лаборатории, нацеленная на выяснение природы рентгеновского излучения. В Архиве Л. де Бройля, хранящемся в Институте Франции, можно увидеть написанные рукой де Бройля переводы на французский язык статей Н. Бора, А. Зоммерфельда, А. Эйнштейна, сделанные в период с 1911 по 1924 гг. [217]. Он внимательно изучал

все работы, которые публиковались в области атомной и квантовой теории. В Коллеж де Франс (College de France) де Бройль слушал лекции П. Ланжевена на протяжении длительного периода: с 1919 по 1925 гг., которые охватывали такие разделы как теория относительности, квантовая и атомная теории. К 1923 г. де Бройлем были опубликованы 15 научных статей с теоретическими результатами, касающиеся различных вопросов строения атомов, квантовой природы излучения. Гениальное открытие де Бройля являлось озарением, но не случайностью. «Молодой человек, высиживайте свое яичко» - любил повторять сам Л. де Бройль [104, с. 78]. О внезапном «прозрении», которое свидетельствует о долгой предварительной бессознательной работе, писал в своей книге «О науке» Пуанкаре. При этом он подчеркивал, что такая работа плодотворна, если ей предшествует, а затем следует период сознательной работы.

Можно привести целый ряд ученых – А. Пуанкаре, П. Ланжевен, М. Планк, А. Эйнштейн, проходивших через такие периоды инкубации идей, которые завершились озарением, или инсайтом (insight). Такие моменты свойственны гениальным личностям, они меняют весь строй нашего мышления, если речь идет об ученых, или чувства современников, если это произведения искусства. «Мгновенное озарение – прерогатива гения» - писал Б.Г. Кузнецов [90, с. 82]. К этому ряду принадлежал и Л. де Бройль. Слова де Бройля о том, что «открытие является результатом интуитивной догадки, опирающейся чаще всего на аналогии и сопоставления, результатом отступления исследователя от обычного хода рассуждений, позволяющего исследователю неожиданно увидеть тот путь, на который он должен вступить» [14, с. 304], можно с успехом применить к его открытию корпускулярно-волнового дуализма. В своих воспоминаниях де Бройль оставил признание: «...в конце лета 1923 г. произошла своего рода кристаллизация: разум в один момент схватывает с большой ясностью... основные очертания новых понятий, которые незаметно формулировались в нем, и он получает вдруг абсолютную уверенность в том, что применение этих новых понятий позволит разрешить большинство поставленных проблем и прояснить весь вопрос, апеллируя к до сих пор не учитывавшимся аналогиям и соответствиям» [233, с. 68]. При глубоком исследовании в открытии де Бройля открываются и присутствие аналогий, и его интуитивные догадки, и прозрения. Если говорить о стиле Л. де Бройля в науке, то он интуитивный. В его научном стиле главную роль играло понимание. Он не был формалистом, демонстрирующим большую математическую мощь, к такому выводу пришел Джеймс Күшинг [258, с. 128].

О понятии инсайта писал Д. Бом: «Что такое теория? Некоторый свет на этот вопрос можно пролить, обращаясь к происхождению сло-

ва, греческое слово «теория» имеет те же корни, что и «театр», в смысле «смотреть» или «ставить спектакль». Это позволяет считать теорию, прежде всего, как способ усмотрения вещей, т.е. как форму инсайта, чем «четко определенное знание о природе вещей» [222, с. 1]. Проблемы научного творчества, связанные с интуицией, сочетанием индукции и дедукции, волновали де Бройля на протяжении всей жизни. Представления по этим вопросам изложены в его многочисленных научно-популярных работах [14, 232, 233]. «Человеческая наука, по существу рациональная в своих основах и по своим методам, может осуществлять свои наиболее замечательные завоевания лишь путем опасных внезапных скачков ума, когда проявляются способности, освобожденные от тяжелых оков строгого рассуждения, которые называют воображением, интуицией, остроумием» - писал Л. де Бройль [14, с. 295]. «Понять» для де Бройля означало дать зрительный образ, увидеть наяву. Ученик де Бройля, хорошо знавший его на протяжении десятилетий, Ж. Лошак писал, что для де Бройля «первой заботой был поиск способа описания явлений, удовлетворяющих разум. В его понимании физики имелась определенная структура, и первое место занимало видение мира, а затем следовали приложения» [104, с. 72].

На формирование и становление Луи де Бройля как исследователя и ученого с мировым именем особое влияние оказали семья де Бройлей, его образование и французские научные и научно-философские традиции. Луи де Бройль (Louis de Broglie) родился 15 августа 1892 г. в Дьепе, в старом нормандском городке, который был в то время модным курортом [274, с. 14]. Его семья пьемонтского происхождения обосновалась во Франции в середине 17 века. Многие члены семьи де Бройлей прославились на государственной службе, среди них были известные военные и политики. Титул принца имели все члены семьи, носящие ее фамилию, а титул герцога принадлежал только старейшему ее члену. После смерти старшего брата Мориса де Бройля (Maurice de Broglie (1875-1960 гг.)) титул герцога перешел к Л. де Бройлю.

История рода де Бройлей подробно изложена в книге, которую написал Ж. Лошак [104]. Основываясь на воспоминаниях самого Л. де Бройля [14], а также книге-биографии «Принц в науке» [104], составлена хронология жизни Л. де Бройля, которая приведена в прил. 5. Литературные записки о семье де Бройлей, воспоминания о брате оставилла сестра де Бройля – Полин, после замужества ставшая графиней де Панж (Pauline de Broglie, Comtesse de Pange (1888-1972 гг.)) [256]. Луи был последним ребенком в семье, кроме него был еще брат Морис, старше его на 17 лет, и две сестры – Полина, старше на 4 года, и Альбертина, старше на 20 лет. Среди членов семьи де Бройль

было много талантливых людей, но мировую известность ей принес Л. де Брайль. «Талант в этой семье был наследственным, пока в ней не появился гений» - писал Лошак о Луи де Брайле [104, с. 22].



*Морис де Брайль, 1914 г. [310]*



*Полин де Брайль, 1929 г. [310]*

Старший брат Морис во многом определил дальнейшую судьбу Л. де Брайля. Морис де Брайль, морской офицер, оставил военную карьеру в 1908 г., чтобы заняться изучением новых явлений в физике, связанных с рентгеновским и радиоактивным излучением, а также с катодными лучами. Его первая статья была опубликована в Докладах Французской Академии наук (*Comptes Rendus de l'Academie des Sciences*) в 1902 г. и посвящена вопросам беспроводной телеграфии и электромагнитным волнам. Еще будучи морским офицером, он занимался конструированием различных электрических батарей, изготавливая электромагнитные катушки, его привлекала экспериментальная физика, связанная с электромагнитным излучением. В 1904 г. он женился и организовал в доме своей тещи лабораторию. Юные Полин и Луи проводили много времени в домашней лаборатории брата. В работу лаборатории на первых порах были вовлечены люди из семейного окружения, известно, что дворецкий исполнял функции лаборанта. Лаборатория М. де Брайля вскоре стала одним из крупных научных центров Франции и просуществовала до 1945 г. [331, с. 29]. В ней начинал работать Л. де Брайль, там он писал свои первые совместные с сотрудниками лаборатории статьи, посвященные изучению с помощью рентгеновского излучения строения атомов.

Первые исследования М. де Брайля были связаны с изучением броуновского движения ионизованных частиц. С помощью микроскопа, и созданного электрического поля, он мог измерять электрический заряд частиц. Эти эксперименты в чем-то были похожи на работы Р. Милликена, проводившиеся в то время в Чикаго. В 1908 г. вся семья (в том числе и 16-летний Луи) присутствовала в Сорbonne на защите докторской диссертации М. де Брайля с темой «Исследования на-

электризованных центров малой подвижности в газах». Диссертация М. де Бройля была выполнена под руководством П. Ланжевена, который затем станет научным руководителем докторской диссертации и Луи де Бройля в 1924 г.

Полин де Бройль также выбрала в качестве основной своей деятельности науку, она занималась литературоведением и защитила докторскую диссертацию в Сорбонне в 1938 г. Переехав в Бельгию, она приняла участие в организации Университета Франции в Страсбурге, ее книги на темы, относящиеся к истории Франции 15-16 вв., удостаивались многочисленных наград, а сама она часто приглашалась с лекциями во многие европейские университеты [310]. Именно общее занятие наукой связывало Л. де Бройля с братом и сестрой на протяжении всей жизни, обеспечивало их духовную близость. «На всех этапах моей жизни и карьеры ты находился рядом со мной, и был моим проводником и опорой» - писал о брате Л. де Бройль [330, с. 274].

Трудно обойти стороной и не остановить внимание на особом социальном статусе, который Луи де Бройль получил с рождением. Он отличался от других физиков в начале XX века своим происхождением – Луи де Бройль имел титул принца. Многие особенности личности де Бройля – независимость, достоинство, уверенность в себе – объясняются его аристократическим происхождением. В числе предков де Бройля были депутаты Национальной ассамблеи и министры, маршалы и члены Французской академии наук. Что означает быть аристократом в век науки? Ответ на этот вопрос можно найти в исследовании аристократической культуры начала XX века во Франции, выполненном М. Най [310].

Происхождение де Бройля составляло большой контраст по сравнению с французским научным сообществом. Родители М. Склюдовской-Кюри были школьными учителями, Пьер Кюри был сыном врача, а дед Поля Ланжевена был слесарем. Первым, кто нарушил правила аристократических семей, согласно которым было невозможно выбирать профессии врача или преподавателя, поскольку эти занятия ассоциировались со словом «работа», был старший брат. Морис де Бройль стал профессором Коллеж де Франс и членом двух академий (Академии наук и Французской академии) [310, 332]. Именно он собственным примером увлек младшего брата и сыграл решающую роль в выборе его будущего. После смерти отца в 1906 г. брат определил Луи в лицей Жансон де Сайи (Janson de Sailly), привилегированное учебное заведение, в которое 20-ю годами позже поступил А. Абрагам, и описал особенности этого лицея в своей книге [4]. Это было закрытое учебное заведение, где учились дети знатных родителей. Немаловажным фактором для будущего Л. де Бройля явилось то,

что физику в лицее ему преподавал бывший учитель Мориса Л. Бризар (Leopold Brizard). М. де Бройль осознанно выбрал этот лицей для брата, т.к. в нем преподавал учитель, когда-то прививший ему любовь к физике.

Юность и поиски призвания, проблемы переходного возраста Луи де Бройля описал брат. Л. де Бройль закончил бакалавриат в 18 лет с такими результатами: «...хороший ученик по французскому языку, истории, физике и философии; средний – по латыни, математике, химии и географии; посредственный ученик по рисунку и иностранным языкам» [229, с. 423]. Будущее еще было не определено. Для получения высшего образования (первая ступень – лицензиат) Л. де Бройль поступает на гуманитарный факультет в Сорбонну, где занимается политической историей. Но стремящийся к глубокому изучению фактов и их логическому развитию, он не находит удовлетворения в изучении политической истории. Его увлекает философия, обращенная к науке. Он изучает недавно опубликованные книги А. Пуанкаре «Ценность науки», «Наука и метод» [131-133]. Насколько велик был интерес к этим книгам в обществе, говорит тот факт, что первая книга Пуанкаре «Наука и гипотеза» вышла в 1902 г. и была распродана в течение нескольких дней. Прочитав, люди передавали ее из рук в руки. В книгах Пуанкаре де Бройль нашел глубокий анализ назначения теоретической физики, в них освещались общие вопросы теории познания, которые так волновали де Бройля. М. де Бройль писал о проблемах переходного возраста своего младшего брата: «История была заброшена ради изучения спецглав математики с целью подготовки к лицензиату по естественным наукам. Колебания закончены, и водораздел окончательно перейден, и с этого момента ход мыслей Луи де Бройля обращен к физике, точнее к теоретической физике. Все это объясняет кризис переходного возраста, который мой брат переживал в 20-летнем возрасте» [229, с. 425].

Подготовку в области теоретической физики Л. де Бройль получил, слушая лекции выдающихся ученых своего времени. Например, общую физику он изучал в Сорбонне у Г. Липпмана, который в 1908 г. был удостоен Нобелевской премии по физике за создание метода цветной фотографии [193, с. 78]. Лекции по теории функций, теории вероятности де Бройль слушал в Парижском университете у знаменитого математика профессора Э. Бореля [129]. После избрания в члены Французской Академии наук в 1933 г. де Бройль станет с Борелем коллегой по академии. Основы релятивизма и теории атома де Бройль осваивал на лекциях П. Ланжевена [156], с которым он обсуждал свои первые идеи, связанные с волнами материи. Лекции по теории относительности, прослушанные де Бройлем в 1910-1911 гг. в Коллеж де Франс у П. Ланжевена, и аккуратно записанные им в отдельные тетради, хранятся в Архиве в Институте Франции [217].

Об особенностях образования Л. де Бройля, которое было таким разносторонним и полным, М. де Бройль писал: «От изучения истории он сохранил понятие последовательности фактов и их различное толкование в течение веков, и определенный скептицизм по отношению к предвзятым идеям, понимание, что строгость применения законов не исключает эволюции их базовых предписаний» [229, с. 428]. Де Бройль на всю жизнь сохранил связь с первым историческим образованием, «он оставался историком по характерным особенностям научного мышления», писал Б.Г. Кузнецов, который встречался с Л. де Бройлем и вел с ним длительные беседы [89, с. 94]. Многие идеи и будущие замыслы, которые де Бройль пытался воплотить в своих научных трудах, близки к концепциям философов. Философские проблемы у него неразделимы с историей познания, а историко-научные вопросы всегда составляли область его интересов. В основе идеи Л. де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме лежали историко-научная вопросы – проблема физической природы света, и оптико-механическая аналогия, своими корнями уходящая в XVIII век.

На окончательный выбор жизненного пути Л. де Бройля повлияли доклады и дискуссии на Первом Сольвеевском конгрессе по физике в 1911 г., ученым секретарем которого вместе с Ланжевеном был М. де Бройль [296]. В 1913 г., в возрасте 21 года, Л. де Бройль блестяще оканчивает лицензиат по естественным наукам со специализацией в области теоретической физики. Но впереди его ждала служба в армии, этот долг все члены семьи де Бройлей исполняли с честью, в том числе и братья Морис и Луи. В качестве простого сапера Л. де Бройль попадает в войсковую часть, а затем по рекомендации брата переводится в инженерный корпус под командованием полковника Феррье на пункт беспроволочного телеграфа, находившегося под Эйфелевой башней. Служба его должна была закончиться в 1915 г. Но 1 августа 1914 г. началась Первая мировая война и Л. де Бройль остался служить в подземном помещении радиопередатчика до 1919 г. Он оказался в центре внедрения нового вида связи для военных нужд, где его теоретическая подготовка в области физики отошла на второй план по сравнению с новыми для него навыками технического применения, он был вовлечен в работу, связанную с использованием многоэлектродных ламп в радиопередатчиках, ремонтом и их усовершенствованием. В 1904 г. Дж. Флеминг изобрел вакуумный диод, а в 1907 г. Л. де Форестер положил начало революционным изменениям в радиотехнике, создав вакуумный триод, который привел к разработке генераторов незатухающих колебаний. Л. де Бройль много лет находился среди устройств, излучающих и принимающих волны, пользовался такими понятиями как бегущая волна, модуляция, частота биений, скорость волны. Идея волны, сопровождающей движение элек-

трона, будет являться центральной идеей при построении им теории волновой механики. В это же время проходил военную службу в инженерном корпусе Леон Бриллюэн (1889-1979 гг.), сын М. Бриллюэна, с ним де Бройль будет обсуждать результаты своей первой теории, поддерживать дружеские отношения впоследствии. Эти годы оставили свой след, Л. де Бройль на протяжении всей жизни сохранял интерес к применению различным достижениям физики, он часто встречался с инженерами и экспериментаторами, и мог обсуждать с ними вопросы прикладного характера. Книга «Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах», написанная де Бройлем в 1940 г. (русс. перевод в [30, с. 205-296]), не потеряла своей актуальности и сегодня, служит прекрасным учебником для изучения теории электромагнитных волн в волноводах. Идеей реальности существования волн де Бройль проникся именно за годы службы в армии. Де Бройль вспоминал: «Тогда я очень многому научился. Я вынужден был размышлять об электромагнетизме и электронах, и постоянно находиться в контакте с экспериментом и практикой, я получил «реалистическое» представление о физических явлениях, которых, я думаю, очень часто не хватает сегодняшним молодым теоретикам» [274, с. 9].



*Луи де Бройль во время службы в армии, г. Париж, 1919 г.  
(фотография предоставлена Фондом Луи де Бройля)*

Демобилизовавшись в 1919 г., Л. де Бройль начал свои первые исследования в лаборатории брата, и они были связаны с теоретическим объяснением спектров рентгеновского излучения. Де Бройль писал: «после окончания войны я сначала обратил внимание на изучение X-лучей и других высокочастотных излучений. В то время я выполнил ряд работ по атомным уровням Бора, по поглощению X-лучей веществом, распределению электронов в тяжелых атомах, по классификации рентгеновских спектральных линий» [243, с. 39]. Он нашел

в лаборатории благодатную почву для расцвета своего таланта. Там он получил уверенность в идее, впервые высказанной Эйнштейном и связанной с существованием квантов света, а также поддержку своих мыслей «по необходимости создания синтетической теории излучения, в которой сочетались бы его «волновой» и «фотонный аспекты» [14, с. 349]. В это время, вспоминал де Бройль, «я много размышлял над уже известными работами Эйнштейна о квantaх света».



*Луи де Бройль, 1914 г. (фотография предоставлена  
Фондом Луи де Бройля, г. Париж)*

Исследования атомов с помощью рентгеновского излучения, которые велись в лаборатории М. де Бройля, были широко известны. Лаборатория была оборудована так же хорошо, как и лаборатория Э. Резерфорда в Англии. М. де Бройль являлся одним из первых исследователей фотоэффекта, вызванного рентгеновскими лучами. С помощью рентгеновского излучения, направленного на медленно вращающийся кристалл, он изучал дифракционные картины [331]. По средам в лаборатории М. де Бройля проходил регулярный семинар, где обсуждались вопросы теории атома Бора, дифракции и спектроскопии рентгеновских лучей, новые экспериментальные результаты по фотоэффекту [232].

Витон (B.Wheaton), исследуя деятельность М. де Бройля, показал, что тот был заинтересован в сотрудничестве с представителями крупных промышленных фирм Франции больше, чем с университетской наукой. Его лаборатория была задумана, прежде всего как центр, способствующий внедрению достижений новой физики в промышленность. Используя преимущества крупных промышленных компаний, он стремился к полезному взаимодействию фундаментальной и прикладной физики. К этому времени подобные многочисленные лабора-

тории существовали в США и Германии, но во Франции лаборатория М. де Бройля была почти единственной [330, 331].



*Сотрудники лаборатории М. де Бройля. В центре - Луи де Бройль, слева – М. де Бройль, справа А. Довилье [323]*

Одним из сотрудников лаборатории М. де Бройля был Александр Довилье, впоследствии профессор Коллеж де Франс. Его интересовали не только поглощение или испускание X-лучей, но также скорости и кинетические энергии электронов, освобожденных в результате поглощения X-лучей. Он пришел к выводу, что электрон, генерирующий X-лучи, обладает той же скоростью, что и электрон в обратном процессе, эмитируемый с поверхности под воздействием X-лучей. Заинтересовавшись этим, М. де Бройль усовершенствовал конструкцию β-спектрометра (спектрометр такого же типа использовался в лаборатории Э. Резерфорда) и приступил к изучению, как он сам называл, спектра скоростей электронов.

В 1921 г. М. де Бройль представил полученные результаты на Третьем Сольвеевском конгрессе [230]. Изучив 10 элементов, начиная с меди, он вывел формулы для расчета энергии стационарной боровской орбиты исходя из кинетической энергии выбитых электронов. Из этих экспериментов становилось понятно: если X-лучи являются волной, сферически распространяющейся от источника, то невозможно себе представить, что отдельный сегмент волнового фронта ударяет электрон с такой же энергией, какой обладал первоначальный электрон, порождающий эту волну. В этом было экспериментальное подтверждение теории фотоэффекта, предложенной Эйнштейном. М. де Бройль писал, что излучение «должно быть корпускулярным, или, если оно является волновым, то его энергия должна быть сконцентрирована в точках волновой поверхности» [224, с. 89]. Пораженный наглядным соответствием между спектром скоростей электронов и спектром X-лучей, М. де Бройль подчеркнул формальное соответствие между поведением электронов и излучением. В 1922 г. в своей книге

«Рентгеновское излучение» он писал: «Есть нечто кинетическое в колебаниях излучения и нечто периодическое в выбросе частиц, все это подтверждает с каждым днем, что одна и та же действительность проявляется в этом, иногда с лицом кинетическим, тогда как в другое время, с волновым лицом» [230, с. 17]. Здесь, может быть впервые, было выдвинуто предположение о симметрии волновых и корпускулярных представлений как для электронов, так и для излучения. В этой атмосфере лаборатории происходило становление Л. де Бройля, он был соавтором многих работ М. де Бройля и А. Довилье. «Мой брат проводил эксперименты по Х-лучам, а я скорее был занят классификацией спектральных линий, которую я выполнял вместе с А. Довилье» - вспоминал Л. де Бройль [285, с. 114].

О совместной работе с братом Л. де Бройль вспоминал, что «между 1924 г. и 1926 г. у нас появилась идея сделать совместную книгу по физике Х-лучей. Мой брат был скорее экспериментатором. Он не очень любил теорию и не очень ее изучал. И тогда мы разделили работу. Мы договорились, что я возьму теоретические главы, а он – экспериментальные. Это видно очень хорошо, если знать два стиля, которые вовсе не одинаковы. Это привело к тому, что книга писалась медленно, потому что когда делаешь книгу на двоих, всегда имеются разногласия и нужно договариваться» [285, с. 113]. Говорить о том, что брат разделял, и являлся соавтором идей Л. де Бройля, нет оснований, они были двумя полюсами – теоретик и экспериментатор, и у каждого был свой путь. Работы М. де Бройля заложили основы рентгеновской спектроскопии, он много сделал для развития прикладной физики и становлению современного инженерного образования во Франции [332]. В 1927 г. за свои заслуги М. де Бройль был избран иностранным членом АН СССР, Л. де Бройль стал иностранным членом АН СССР значительно позднее, в 1958 г.

Не столь широко известно, что Луи и Морис де Бройли вместе дважды (в 1925 г. и 1926 г.) выдвигались на Нобелевскую премию по физике русским профессором О.Д. Хвольсоном, об этом пишет М. Най в своей статье [310]. В 1928 г. Хвольсон, за исследования в области Х-лучей, номинирует одного Луи, указывая его особый вклад в создание волновой и квантовой теории света. В это же время свое предложение в Нобелевский комитет с кандидатурой Л. де Бройля делает А. Эйнштейн. И в ноябре 1929 г. Луи де Бройль удостаивается Нобелевской премии по физике. Его речь при вручении премии содержит анализ проделанной работы от первоначального размышления над корпускулярной и волновой природой света до экспериментального подтверждения волновой природы материи [29, с. 541-552].

А. Довилье вспоминал о работе Л. де Бройля в лаборатории: «Л. де Бройль живо интересовался экспериментальными работами. Он

привнес в коллоквиумы, проводимые в лаборатории, ясное видение явлений и дух синтеза, который открывал нам единство проблем излучения, в то время еще довольно смутное» [265, с. 172].

Начиная с 1920 г., внимание Л. де Бройля было обращено не столько к структуре излучения, сколько к структуре атома. Центральной проблемой в применении рентгеновского излучения к изучению структуры атома являлось определение числа электронов, занимающих каждую из разрешенных боровских орбит. Он публикует статьи, которые посвящены вычислению граничных частот  $K$ - и  $L$ - полос поглощения тяжелых элементов, распределению электронов в атомах тяжелых элементов. Библиография научных работ Л. де Бройля представлена в прил. 3.

С 1921 г. интересы Л. де Бройля изменяются, и он занят поисками объяснения экспериментальных фактов, обнаруженных М. де Бройлем. Экспериментальные результаты показывали, что рентгеновский луч передает целиком свою энергию отдельным электронам. Луи де Бройль развивает теорию поглощения X-лучей веществом, рассматривает вопросы, связанные с уменьшением частоты кванта в последовательных переходах с испусканием высокочастотного излучения, с термодинамическим равновесием, которое устанавливается при прохождении X-лучей через вещество, путем уменьшения частот излучения. В статье (1921 г.) «Об уменьшении частоты кванта» Л. де Бройль отмечает интересную аналогию между явлением испускания атомом кванта меньшей частоты по сравнению с энергией поглощенного им кванта и явлением перехода тепла от горячего тела к холодному в термодинамике. Он пишет: «Как теплота стремится перейти от теплых тел к холодным, так и излучаемая энергия стремится перейти от более высоких частот к более низким» [29, с. 181]. Начиная с 1922 г., Л. де Бройль с помощью гипотезы Эйнштейна о квантах света решает ряд задач (находит закон излучения абсолютно черного тела, объясняет явление интерференции), которые через год позволяют ему в трех коротких статьях сформулировать свои идеи о волнах материи, сопровождающих движение частиц материи.

Заканчивая рассмотрение особенностей образования, личных качеств Л. де Бройля, необходимо отметить следующее. Задача, которую поставил перед собой Л. де Бройль в 1921 г., говорит о его склонности к рассмотрению глобальных научных проблем и поисков их наиболее общих решений. Его обращение к проблемам природы света и природы материи подтверждает это. Проблема природы света стояла перед человеком «как вызов его жажде познания с того времени как он начал всматриваться в окружающий его мир, ибо свет, будучи нашим главным средством познания внешнего мира, никогда не раскрывал своей сущности, будучи «посредником» между материей и

наиболее тонким нашим чувством, никогда не появлялся без покрова таинственности» - так описывает в своем исследовании многовековую проблему природы света М. Джеммер [53, с. 232]. В 1920-е годы гипотеза Эйнштейна о квантовой природе света получила свое экспериментальное подтверждение, но теории, соединяющей обе стороны света – корпускулярную и волновую, не существовало, она только зарождалась. Предлагались различные варианты, среди них была и теория де Бройля. Он предложил рассматривать «атомы света» (этот термин появился в его работах 1922 г.) наравне с другими частицами материи, и в 1923 г. сформулировал понятие фазовой волны, сопровождающей движение любой частицы. Никаких фактов, указывающих на существование волновых свойств материи, не было. Исходя из корпускулярно-волновой природы света, де Бройль смог обосновать корпускулярно-волновой дуализм материи.

На протяжении всей долгой научной жизни Л. де Бройля привлекали крупные теоретические проблемы, поиск физического смысла и наглядного представления. Его всестороннее и глубокое образование позволило усмотреть физические аналогии там, где другие их не замечали. Многие физики в начале 1920-х годов все еще считали спорными представления о квантах света Эйнштейна, и обращение к ним де Бройля свидетельствует о независимости суждений и самостоятельности мышления молодого физика.

## **1.2. «Я работал в глубоком одиночестве»**

Большую роль для понимания особенностей работы Л. де Бройля в период работы над проблемой «загадочных квантов» имеет его признание: «Когда я думаю о периоде моей жизни от 1919 г. до 1928 г., в который я пришел к первым идеям волновой механики, меня поражает то, что я работал в глубоком одиночестве. Хотя я в то время слушал лекции, которые мне многое дали, особенно лекции Поля Ланжевена и Эмиля Бореля, хотя я тогда работал также в лаборатории моего брата, мои научные размышления происходили тогда в глубоком одиночестве. Это одиночество было обусловлено отчасти обстоятельствами личной жизни, но главным образом тем, что в то время во Франции лишь немногие физики следили за развитием квантовой теории, которая меня очень интересовала и которая быстро развивалась в некоторых странах» [14, с. 281].

Следует отметить «обстоятельства личной жизни», о которых говорит де Бройль. Он воспитывался в семье, где он был самым младшим, и формирование его личности происходило исключительно в окружении взрослых людей, вне школьных заведений (исключение – закрытый лицей Жансон де Сайи, в который он поступил в 14 лет), где де Бройль приобретал бы опыт общения со сверстниками. П. Жермен,

ставший непременным секретарем Французской академии наук после смерти Л. де Бройля, писал: «Похоже, он никогда не был вовлечен в научное сообщество. Он больше общался с великими древними в их произведениях, чем со своими современниками на коллоквиумах и конгрессах» [274, с. 588].

Одиночество де Бройля имело, конечно, и внешние причины, но в большой степени оно было осознанное. Де Бройль осознавал, что одиночество предохраняет его от проторенных путей, «делает мысль более сильной и оригинальной». Он вспоминал о нем с благодарностью: «Именно в этот период одиночества я смог выполнить свои самые значительные работы» [14, с. 282]. Тема одиночества де Бройля имеет много общего с одиночеством, которое испытывали и Эйнштейн [117, 118], и Шредингер [183, 192]. Их вместе объединяло неумение работать над коллективными программами, следовать за лидером, хотя для них, безусловно, существовали авторитеты в науке. Постепенно, по мере развития преподавательской деятельности и создания научной школы, де Бройль приобрел единомышленников, с кем он вместе решал определенные задачи.

К внешним причинам одиночества Л. де Бройля следует отнести обстановку вокруг образования и научных исследований в области теоретической физики во Франции в начале XX века. Относительно мало французских ученых оказали влияние или внесли вклад в развитие новой неклассической физики. Причина этого, вероятно, кроется в особенностях научного сообщества во Франции в первой четверти XX века. В своем исследовании Д. Мехра подробно анализирует эту ситуацию [306]. Во всей Франции существовали только три кафедры теоретической физики, две из них находились в Париже, перспектив у физика, занимавшегося теоретической физикой, практически, не было. Л. Бриллюэн, ставший профессором в Коллеж де Франс, изучал теоретическую физику с 1908 г. по 1920 г., в своих воспоминаниях он писал: «В структуре французской науки не существовало будущего для физика-теоретика. Те, кто имели склонность к теориям, могли выбрать себе чистую математику. Любой самый маленький университет имел одну-две кафедры математики.... Многие из моих коллег говорили: Ты сумасшедший? У тех, кто занимается теоретической физикой, нет будущего» [306, с. 546]. Другим неблагоприятным фактором была Первая мировая война, когда все, кто служил в армии и кто не служил, работали для войны. Полковник Феррье, под командованием которого был Л. де Бройль во время войны, возглавил исследования в области распространения радиоволн. Техника беспроводной связи развивалась очень быстро, активно использовались многоэлектродные лампы, изобретенные в Америке, и эта область получила свое бурное развитие во время войны.



Л. де Бройль, 1 января 1924 г. [315]

В то время, когда в Германии и Англии шло становление научных школ и бурное развитие теоретической и экспериментальной физики, французские ученые в период с 1914 г. по 1918 г. сохраняли молчание. Такие журналы как, например, «Журнал физики» (*Journal de Physique*) вообще перестали выходить в эти годы. Кроме этого в конце войны научное сообщество Франции призывало прервать все обмены с учеными из Германии и Австрии. Поэтому, в 1920-е годы, когда быстро развивалась физика, и ученые часто обменивались информацией устно на конференциях и встречах или с помощью писем, французские ученые находились в изоляции, и узнавали новости из публикаций с соответствующим запаздыванием. Конечно, некоторые контакты сохранились. Например, П. Ланжевен и М. Кюри поддерживали связи с А. Эйнштейном, находившимся в Берлине. Французские физики – Л. и М. Бриллюэны, М. де Бройль, М. Кюри, П. Ланжевен, Ж. Перрен, П. Вейс участвовали в работе третьего Сольвеевского конгресса в апреле 1921 г. в Брюсселе. Но этого было явно недостаточно для широкого развития исследований в области новой физики, связанной с изучением строения атома. Работы только двух французских физиков – Л. де Бройля и Л. Бриллюэна, представлены в списке публикаций по квантовой механике, который исследовали Кожевников и Новик в своей работе «Анализ динамики информационных процессов в ранней квантовой механике» [75]. Рисунок, выполненный авторами, дает представление о составе научного сообщества в квантовой механике, которое сформировалось к концу 1927 г. (рис. 3).

Состояние теоретической физики во Франции в первую четверть XX века рассматривается также в работах Витона [330, 331]. Автор показывает, что по сравнению с другими странами, в которых наблюдается резкий скачок количества физиков, рожденных около 1900 г. (верхний график на рис. 4), число французских физиков в этот период остается практически неизменным (нижний график на рис. 4).

Личные впечатления от знакомства с работой научных институтов во Франции можно прочитать в письмах Я.И. Френкеля, написанных им в период своей стажировки в европейских научных центрах в 1925-1926 гг. В письме от 17 апреля 1926 г. он пишет: «Институт М-те Кюри на меня особенного впечатления не произвел. Вообще во Франции по части научных институтов дело «швах». Впрочем, в этом году обозначился некоторый сдвиг в сторону увеличения кредитов на научно-исследовательские работы и институты (при вузах; иных не имеется)» [181, с. 163].

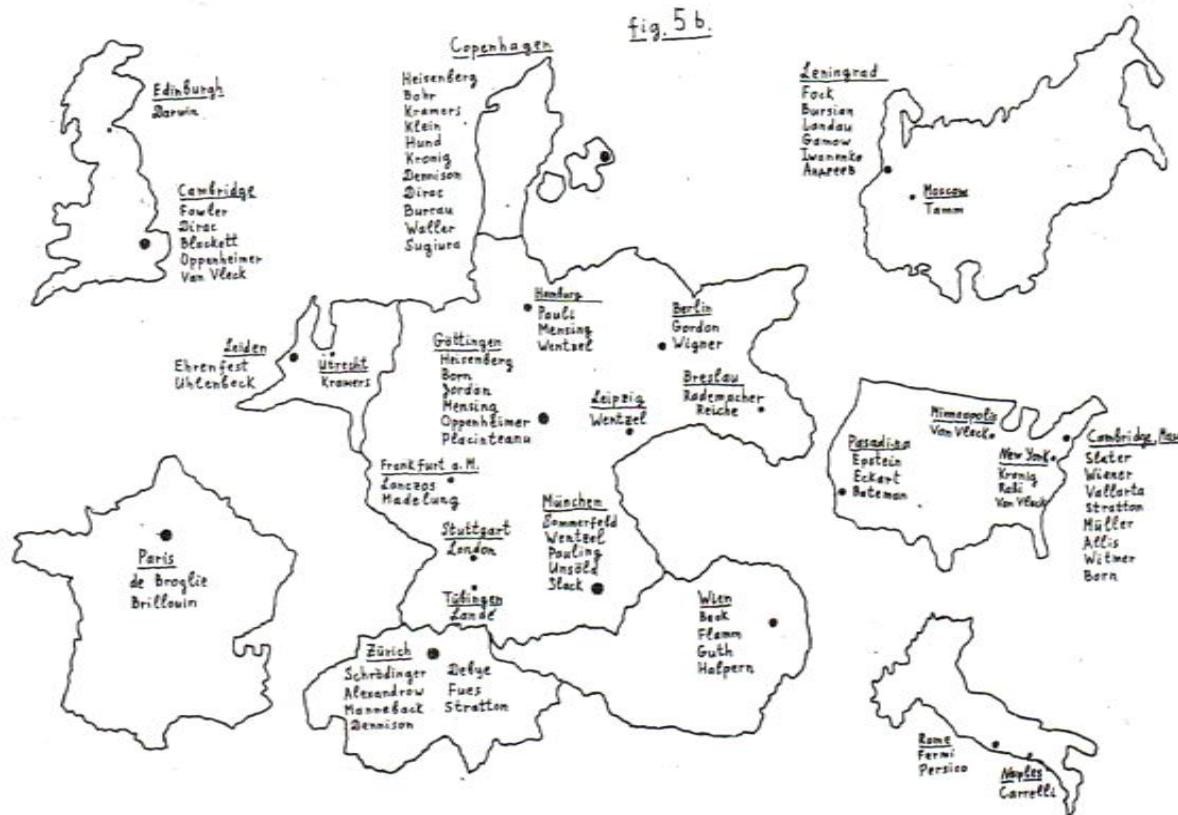


Рис. 3. Формирование научного сообщества  
в квантовой механике [75]

О годах, проведенных де Броилем на войне, известно очень мало. Он писал: «Мировая война 1914-1918 гг. внезапно прервала на несколько лет мои размышления, которые, как, вскоре, оказалось, шли в правильном направлении» [14, с. 347]. Конечно, его образование и компетенция в такой передовой научно-технической области как беспроволочный телеграф были необходимы его стране во время войны. Но представим себе эти годы в жизни молодого человека в возрасте от 21 до 27 лет: интеллектуальный расцвет и страстная увлеченность нарождающейся новой физикой, «природой таинственных квантов, глубокий смысл которых еще мало кто понимал», а с другой стороны практические полная изоляция и невозможность развивать свои теоретические исследования в эти годы.

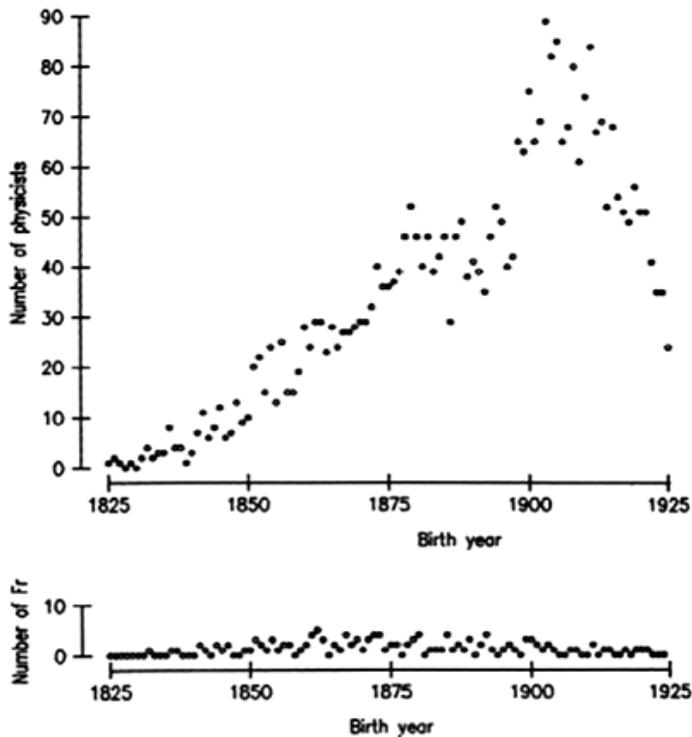


Рис. 4. Численность физиков, родившихся в период 1825–1925 гг. [331]

Морис де Бройль писал: «Мой брат сожалел о том, что его занятия наукой были прерваны, и впоследствии будет выражать свое сожаление, что его вдохновение было разбито на куски, и было восстановлено только через несколько лет» [229, с. 426]. Этот период жизни, когда молодой человек, который вынужден отложить любимое занятие физикой, испытывает изоляцию, и мечтает скорее вернуться к оставленным занятиям, конечно, оказал влияние на характер и создал предпосылки для дальнейшего «одиночества» Луи де Бройля. После демобилизации он будет вынужден наверстывать упущенное время, отказавшись от всего, что не связано с его теоретическими исследованиями. Ж. Лошак так описал выбор де Бройля: «Он вошел в физику, как приобщаются к религии, и почти по-монашески посвятил себя науке» [104, с. 46]. Один из единомышленников де Бройля в годы его работы над идеей волн материи, Л. Бриллюэн, вспоминал: «Я думаю, мы были только втроем – его брат, Ланжевен и я, с кем он говорил о своей диссертации, когда он ее писал. Он всегда был очень тихим человеком, интересным, но довольно застенчивым» [306, с. 549].

Чтобы понять особенности поведения Л. де Бройля и восприятия его окружающими, можно обратиться к воспоминаниям Ж. Лошака: «Скромный, поглощенный своими мыслями, на людях он скучал, говорил мало, а его отсутствующий вид часто принимали за желание выказать превосходство. Он был по-своему внимателен к окружающим, правда, проявлял расположение так незаметно, что объекты его забо-

ты иногда только случайно понимали это. Он замыкался в себе, когда громко разговаривали, и не участвовал в коллективных дискуссиях, держась в стороне, иногда нашептывая какие-то замечания, которые в ходе разговора никто не слышал и не понимал. Его отношения с университетскими коллегами и академическими собратьями были любезными, но не более, и окружающие не могли исправить ситуацию» [104, с. 12]. Я.А. Смородинский и Т.Б. Романовская в своей статье также обратили внимание на одиночество де Бройля. Они пишут, что «надо было обладать поразительной духовной независимостью, чтобы в одиночку двигаться по еще никому не веданной дороге» [144, с. 757].

Де Бройль своим поведением, образом жизни совсем не укладывался в образ аристократа. Французский физик А. Абрагам, который участвовал в работе первых семинаров де Бройля, писал: «Луи де Бройль всего несколько раз бывал за границей. Он никогда не водил машины, ходил пешком или на метро. Он оставался на лето в Париже, не выезжал на выходные. Никто не видел его разгневанным и не слышал, чтобы он повышал голос» [4, с. 80]. Б.Г. Кузнецов после личных встреч с Л. де Бройлем писал о том, что его он «поразил сочетанием и неотделимостью явной гениальности и явной обыкновенности; похож на всех и никто - на него» [90, с. 85]. Все эти особенности личности, обусловленные происхождением, воспитанием, а также несомненная гениальность позволяли ему идти своим путем, выдвигать оригинальные идеи, не заботясь о публичном признании.

В работе Рамана и Формана [320] исследуется вопрос о негативном отношении к Л. де Бройлю со стороны ряда физиков, которое сложилось в 1921-1925 гг. в научных центрах Копенгагена и Геттингена, занятых вопросами строения атомов и развитием квантовой теории. В своих работах 1921-1922 гг. (статьи «О теории поглощения X-лучей веществом и о принципе соответствия» и «X-лучи и термодинамическое равновесие») Л. де Бройль дал интерпретацию принципа соответствия и его применения, совсем отличную от Боровского принципа соответствия. Вопрос, на который де Бройль и Бор отвечали по-разному, заключался в следующем. Имеет ли любая степень свободы электрона в атоме право на квантовое число? Этот вопрос касался числа оптических и рентгеновских энергетических уровней, связанных с каждым значением главного квантового числа, а также числа электронов с данными квантовыми числами в атоме любого элемента. Совместные статьи А. Довилье и Л. де Бройля вступили в конфликт с работами Н. Бора и Д. Костера. Исследования рентгеновских спектров имели большое значение для выяснения структуры внутренних оболочек атомов. Результаты экспериментов позволили определить особенности схем распределения электронов в атомах. Конфликтный момент возник у Л. де Бройля с копенгагенской школой также по пово-

ду нового элемента с атомным номером 72 в таблице Менделеева. В 1922 г. Довилье утверждал, что с помощью рентгеноскопии он установил идентичность редкоземельного элемента кельтия под номером 72. Но согласно теории Бора элемент 72 должен быть ближайшим гомологом циркония. Этот факт нашел отражение в Нобелевской лекции Н. Бора, где он отметил, что Костер и Хевеши [257] доказали нахождение элемента 72 в циркониевых минералах. Новый элемент был назван гафнием в честь города Копенгаген (латинизированное название Hafnia) [119]. Де Бройль и Довилье допустили ошибку в своих расчетах, вопрос, казалось, был исчерпан. Но де Бройль и Довилье настаивали на своем приоритете в письме к редактору журнала «Philosophical Magazine» в 1925 г. [237].

В своем исследовании, рассматривая аристократическую культуру и научные достижения семьи де Бройлей в XX веке, М. Най делает следующий вывод. «Социальный класс и аристократическая культура отдалили де Бройлей от основного направления научной жизни современной Франции, и только взаимная поддержка внутри семьи дала результаты – необыкновенно высокие интеллектуальные достижения для этой научно-ориентированной семьи аристократов» [310, с. 421]. Учитывая огромное влияние, которое оказал старший брат на Л. де Бройля на этапе его становления, с этим выводом трудно не согласиться. Но подобный вывод не учитывает гениальные способности самого Л. де Бройля, которые развились в крайне неблагоприятной ситуации, характеризующей состояние теоретической физики во Франции. Аристократическая культура не отдалила Луи де Бройля от научной жизни Франции, а способствовала тому, что он сделал независимый выбор своего научного пути, и сумел добиться высоких результатов. Принцип корпускулярно-волнового дуализма материи, открытый де Бройлем, послужил формированию магистрального направления в физике – квантовой механики. А сам Л. де Бройль сыграл положительную роль в научной жизни Франции в XX веке, возглавляя теоретические исследования в Институте Анри Пуанкаре. Л. де Бройль широко известен своей педагогической деятельностью, а также организаторскими способностями на посту непременного секретаря Французской академии наук [218, 274].

### **1.3. Влияние французской научной мысли на мировоззрение Л. де Бройля**

Для того чтобы понять ход мыслей ученого, которые привели к революционным идеям и теориям, необходимо посмотреть назад, на истоки учителей и предшественников. Для Луи де Бройля такой питательной почвой, несомненно, была французская научная мысль в лице Р. Декарта, О. Френеля, Ж. Лагранжа, А. Пуанкаре. Сам Луи де

Бройль писал: «От Лавуазье и Кулона до Огюстена Френеля, Андре Мари Ампера и Сади Карно, включая Лапласа, Лагранжа, Гаюи, Ламарка, Коши, Фурье – в этом поразительном списке имен великих французских ученых можно найти имена ученых, стоящих у истоков всех главных отраслей современной науки» [14, с. 330].

Вклад французской науки в современную физику огромен: математические теории, экспериментальные данные современной физики нельзя изложить без ссылок на французских мыслителей. Феномен «Французской революции», совершенной в физике вначале XIX века, исследуется Вл.П. Визгиным в [39]. Если из современного курса физики «вырвать» страницы, на которых упоминаются их имена, то в этом курсе будут зиять большие дыры. Что отличает научную мысль, характерную для французской физики и математики, начиная с XVII века? Одной из особенностей исторического процесса в XVII веке во Франции было развитие рационализма. Содержание рационалистических идей, которые шли из Франции, представляло собой новую схему мироздания - рациональную схему, построенную строго логически и претендовавшую на однозначный характер. Однозначность выводов рационалистической мысли связана с ее эмпирической компонентой. Если из науки ушла абсолютнаястина Откровения, значит, критерием однозначности стала эмпирическая проверка.

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» [77, с. 15]. 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»). «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 Лейбниц» [77, с. 205]. Значение созданной Декартом физики выразил Э. Уиттекер: «Рене Декарт впервые предпринял попытку переосмысления идей, касающихся физической Вселенной. Декарт основал механистическую философию» [167, с. 21]. От Декарта шло представление о реальном физическом движении материи относительно пространства-времени. 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 [52].

Для физики Р. Декарта характерно физическое представление о феноменологических и субстанциональных свойствах. Цепь его рассуждений, доказывающих тождество материи и пространства, заканчивается утверждением: «в идее тела содержится только трехмерная протяженность, в идее пространства – тоже только трехмерная протяженность; следовательно, тело и пространственный объем – идентичные понятия» [52]. В его рассуждениях все время встречаются ссылки на эмпирически постижимые факты. Согласно декартовской философии протяженность создает материю, а материя – пространство. Историческая судьба работ Декарта рассмотрена Б.Г. Кузнецовым, который показал большое воздействие в целом картезианской физики на «умственное развитие Европы» [88, с. 86].

Де Бройлю представления картезианской физики были близки, они составляли часть его мировоззрения. Он неоднократно обращался в своих работах по философии естествознания к обсуждению основ физики Декарта [14, 232, 233]. Де Бройль считал, что представление физических явлений «посредством фигур и движений» можно понимать в узком и широком смысле. Узкое истолкование заключается в следующем. Весь физический мир состоит из тел, которые изменяют свое положение под влиянием их взаимодействия согласно законам механики. Широкое истолкование программы Декарта де Бройль видел в более абстрактном и широком смысле. Да, физическая реальность описывается величинами, определенными в любой точке пространства, и изменяющимися с течением времени по определенным законам. Но это описание не обязательно сводится к образам частиц, и для него не обязательно использовать только законы механики. И широкое и узкое истолкование посредством фигур и движений, пишет де Бройль, соответствует естественной потребности физика описать то, что он наблюдает с помощью понятий времени и пространства. При этом используется идея непрерывности хода событий. В этом заключается представление о строгом детерминизме. Математическое выражение детерминизма осуществляется с помощью дифференциальных уравнений, которые позволяют представить мгновенное изменение состояния за бесконечно малое время.

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 возродил волновую теорию света Гюйгенса на основе механики, допуская, что световые колебания происходят в невидимой упругой среде – эфире. Огюстен Френель родился в 1788 г., на сто 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. Л. 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 беломраморный бюст Френеля. О своих личных впечатлениях при посещении де Бройля в Академии наук писал Д.Д. Иваненко: «Небольшой строгий кабинет Л. де Бройля украшен прекрасным бюстом Френеля» [63, с. 337]. Позже об отношении де Бройля к Френелю писал Лошак: «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» [104, с. 18]. Френель, начав экспериментальное изучение интерференционных явлений, известных еще с XVII века, показал, что эти явления полностью описываются волновой теорией света [169, 126]. Из его теории следовало прямолинейное распространение света в однородной среде. С помощью введенной гипотезы о поперечности колебаний в световой волне он дал полную теорию поляризации и двойного лучепреломления, разработал теорию распространения света в анизотропных средах. Луи де Бройль с восхищением писал: «Эти работы - настоящие шедевры теоретической физики» [16, с. 37].

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. «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 абстракции» - такой вывод делает де Бройль [14, с. 10]. Если до Максвелла физический мир представлялся с помощью совокупности дискретных материальных точек, движение которых описывается уравнениями Ньютона, то после него добавились непрерывные поля, подчиняющиеся системе дифференциальных уравнений Максвелла.

Де Бройль считает, что для электромагнитного поля «описание посредством фигур и движений оказывается несостоятельным, если его понимать в узком смысле, но оно продолжает сохраняться, если его понимать в более широком смысле, то есть как представление с помощью вполне локализованных величин, непрерывно изменяющихся в рамках пространства и времени» [14, с. 168]. Физический мир со-

стоит из двух реальностей – вещества и поля, в основе которых, казалось всем в начале XX века, лежат несводимые друг к другу понятия – дискретная материальная точка и непрерывное поле. Де Бройль, пытаясь соединить квантовые и волновые представления о свете, решал историко-научную задачу. Обоснование этой задачи он дал в историческом введении в своей диссертации: учитывая двойственность полей и частиц, осуществить синтез этих двух аспектов физической реальности. При этом он стремился реализовать широкое истолкование Декарта, оставаясь в своих представлениях в рамках картезианской физики. В оптико-механической аналогии он увидел физическое решение своеобразного дуализма, существовавшего в физике в начале XX века в виде двух систем - Ньютона и Максвелла. Эти две системы – отражение двух несводимых друг к другу элементарных понятий: дискретной материальной точки и непрерывного поля. «Гениальное обобщение Максвелла хотя и изменило представление о природе световых волн, но оставил не тронутой веру, что свет образован волнами с непрерывным распределением энергии» - писал Л. де Бройль [21, с. 105].



*Луи де Бройль, 1927 г.*

Де Бройль начал свое образование с глубокого изучения классических теорий аналитической механики, в частности теорий Гамильтона и Якоби. «Интеллектуальный порыв, позволивший сделать окончательный выбор, вел его к фундаментальным вопросам теоретической физики в тесной связи с философией наук» - писал М. де Бройль

[229, с. 424]. Первое историческое образование Л. де Бройля помогло ему увидеть историко-научную проблему, какой являлась проблема дуализма света, и обосновать свою идею корпускулярно-волнового дуализма как для света, так и для всей материи. Опираться он будет на теорию познания. В «Правилах для руководства ума» Декарт развивает учение об интуиции, которую ставит в теснейшую связь с дедукцией [52, с. 77-170]. Влияние идей Декарта прослеживается при рассмотрении работ де Бройля о двух противоположных путях, которыми следует человек при построении научных теорий, дедукции и индукции. О дедукции и индукции в научных исследованиях де Бройль размышлял в юности и зрелые годы [14, 232, 233, 235]. Дедуктивное умозаключение исходит из концепций и принятых постулатов априори, и пытается из этого делать заключения при помощи правил логики. Де Бройль писал: «Вначале, рассуждая об абстрактных формулах, где физические символы представлены символами, ученый, который использует дедуктивное умозаключение, как бы сматывает на катушку нить уравнений, следуя правилам логики, и приходит к окончательным соотношениям, которые он хочет проверить. Теперь он должен заменить символы цифрами, чтобы получить формулы, сравнимые с опытом: доказательство уступает место расчету... дедуктивное умозаключение кажется с первого взгляда главным и правильным инструментом научного познания» [234, с. 277]. Но есть и слабые стороны у дедуктивного умозаключения. Исходя из постулатов, дедукция может вытащить только то, что они уже содержали. «Большие открытия, броски вперед научной мысли делаются индукцией, методом отважным, но действительно созидательным» - уверен де Бройль [Там же, с. 278]. Индуктивное умозаключение труднее определять и анализировать. Оно опирается на аналогию, интуицию, оно пытается разгадывать то, что еще неизвестно. В этом смысле индуктивное заключение смелее и опаснее, чем дедуктивное. «Дедукция – это безопасность, по крайней мере, внешне; индукция – это риск. Но риск – необходимое условие всех больших подвигов и индукция, потому что она пытается удалиться от уже начертанных дорог, пытается расширить уже существующие рамки мысли – настоящий источник больших научных достижений» [Там же].

Индуктивная интуиция была в сильной степени развита у Л. де Бройля, и активно применялась им при построении физических теорий, которые открывали совершенно новые направления, как это было с развитием квантовой механики, или новая теория света, получившая развитие благодаря методу слияния. Об этих особенностях личности де Бройля говорит и Лошак: «Для де Бройля понять явление – это означало придумать интуитивно понятную физическую модель» [151, с. 11]. Плодотворная физическая идея, какой была идея де

Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи, первоначально интуитивная, обрастает впоследствии соответствующим математическим формализмом. Только дедукция может дать научным теориям точность и строгость, дать доказательства и отнести излишние фантазии. Но, считал де Бройль, «заключенная в тюрьму ее собственной строгости» дедукция не может убежать за рамки, которые она сама себе установила. Вклад Л. де Бройля в физику следует рассматривать именно с точки зрения сделанного им индуктивного открытия, раздвигающего рамки существующих концепций. Ценность открытия де Бройля можно описать его же словами: «Большие открытия, броски вперед научной мысли делаются индукцией, методом отважным, но только единственно созидательным. Это всегда благодаря изменениям, внесенным в концепции и постулаты, которые раньше служили базами для дедуктивных умозаключений, открылись все новые эры Науки» [234, с. 278].

В истории физики можно найти другие примеры гениальных гипотез, которые выдвигались благодаря размышлению, построенным на убеждении в существование симметрии и гармонии мира. Одиночество идей де Бройля о волнах материи сродни одиночеству И. Кеплера в его глубоких размышлениях о строении Солнечной системы. Математическое оформление глубоких идей Кеплера было дано Ньютона. Роль Ньютона в создании волновой механики досталась Э. Шредингеру.

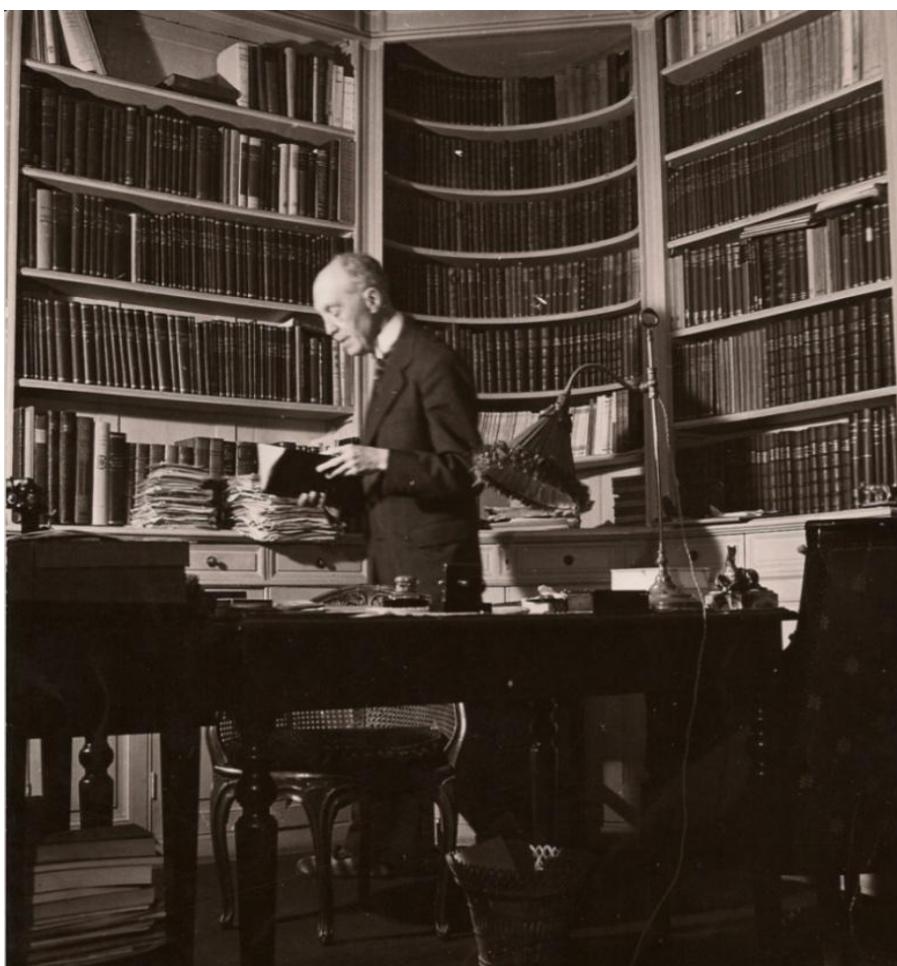
На формирование мировоззрения Л. де Бройля определенное влияние оказали лекции одного из крупнейших философов XX века, лауреата Нобелевской премии по литературе 1927 г. А. Бергсона (1859-1941 гг.). Он слушал в Коллеж де Франс лекции Бергсона о пространстве, времени, о парадоксах Зенона, и здесь имело значение не то, как Бергсон отвечал на эти вопросы, а сам факт пересмотра традиционных взглядов. Де Бройль писал, что на него «еще в юности произвели сильное впечатление столь оригинальные идеи Бергсона о времени, длительности и движении» [15, с. 212]. Л. Фейер отмечает еще особенность, связанную с большим интересом к философии Бергсона. Для молодежи, слушавшей лекции Бергсона, был характерен протест против традиционной для Сорбонны приверженности к идеям прошлого [272]. А в лекциях Бергсона утверждалось, что основные понятия науки – время, пространство, движение, должны эволюционировать. О том, был ли де Бройль учеником Бергсона, рассуждает Б.Г. Кузнецов [87] и приходит к выводу, что близость идей Бергсона и де Бройля вытекает из связей собственно философских проблем с историей познания. И.И. Блауберг в своей статье [7] рассматривает отношение де Бройля к творчеству Бергсона, в частности к концепции времени. Это отношение де Бройль выразил в своей статье «Теории

современной физики и идеи Бергсона о времени и движении», написанной в 1941 г. [15]. Статья де Бройля, пишет Блауберг, «свидетельствует об интересе великого физика к философии, его умении схватывать ключевые моменты в сложном, многоплановом учении... Луи де Бройль показывает, как в его учении (Бергсона – А.С.) развивались посылки, которые вырастали из осмыслиения ситуации в науке конца XIX века и подталкивали к изменению научного взгляда на мир» [7, с. 205]. Де Бройль увидел близость интерпретации Бергсоном парадоксов движения с идеями квантовой механики. В них нельзя обнаружить строгое изложение принципов квантовой механики, «нельзя отождествлять точные формулировки квантовых теорий с глубоким, но часто смутными и ускользающими интуициями знаменитого мыслителя» [15, с. 213]. Бергсон обращался к аргументам древнегреческого философа Зенона Элейского, чтобы показать, какая тайна скрывается за внешне простым понятием движения. Зенон рассматривал прохождение объекта через данную точку, как некоторую остановку объекта. Стрела ни в какой момент полета не может занять определенное положение, поскольку, если бы она его заняла, она была бы неподвижной. В этом де Бройль видел соответствие принципу неопределенности импульса микрочастицы при определении ее координат в квантовой механике. Соотношение неопределенностей Гейзенберга говорит о том, что невозможно приписать элементарной частице определенное состояние движения и в то же время определенное положение. Де Бройль пишет, что «некоторые фразы Бергсона следовало бы существенно изменить, если бы мы хотели сделать более ясной аналогию между концепцией философа и новыми теориями физиков, но в самом тексте его книг аналогия выступает подчас вполне отчетливо» [15, с. 220]. Де Бройль обращает внимание, что «квантовая механика, предлагая новый образ эволюции физического мира, показывает, как природа ежеминутно колеблется между множеством возможностей» и находитозвучные мысли Бергсона – «время есть само это колебание, или же времени не существует» [Там же].

Уже в зрелые годы, совершив свое открытие, де Бройль прочитал книгу Э. Мейерсона «Релятивистская дедукция», опубликованную в 1925 г. Французский философ Эмиль Мейерсон (1859-1933 гг.) был близок де Бройлю в понимании философии, прежде всего, как эпистемологии, логики и методологии научного познания. Работа Мейерсона (1933 г.) «Реальное и детерминизм в квантовой механике» явилась попыткой гносеологического обобщения квантовой механики, в которой он рассматривает в целом различные интерпретации квантовой механики, как общепринятую, основанную на принципе дополнительности Бора, так и версию де Бройля и Эйнштейна, пытающихся выйти за рамки вероятностного представления. Мейерсон рассматривает

вает эволюцию детерминизма, который сначала был классическим, затем релятивистским, позже квантовым, уступающим место кванто-релятивистскому детерминизму.

Де Бройль дал глубокий анализ идей Мейерсона в своем предисловии к последней книге философа «Опыты» [307]. Де Бройль считал так же, как и Мейерсон, что наука исторична, она наследует предшествующие достижения не столько как готовое знание, сколько как материал, подлежащий переоформлению в новую схему с учетом изменившейся перспективы видения. В своей лекции «Польза и уроки истории науки» де Бройль выражает собственную точку зрения о том, что прогресс науки сравним с движением по спирали: «движение по спирали периодически приближает нас к некоторым уже пройденным стадиям, но не следует забывать, что число витков спирали бесконечно, и что витки увеличиваются и поднимаются вверх» [14, с. 310].



*Л. де Бройль в личном кабинете, 1972 г.  
(Фотография предоставлена Ж. Лошаком)*

Из истории де Бройль хорошо знал многочисленные примеры движения научной мысли по спирали, когда осуществляется синтез представлений, на первый взгляд кажущихся противоречивыми. Де Бройль, выступающий как историк науки, подчеркивал, что современ-

ная наука является лишь временной ступенью, подготавливающей будущее. В революционных достижениях современной науки содержатся достижения прошлого. Изучение квантовой механики позволяет увидеть в ней присутствие идей Ньютона и Максвелла, а также древнегреческих ученых.

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 века, посвященный 60-летнему юбилею де Бройля, назван «Физик и философ» [291]. 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 подчеркивал: «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 реальность» [14, с. 172].

## **ГЛАВА 2. ГЕНЕЗИС КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВОГО ДУАЛИЗМА МАТЕРИИ**

### **2.1. Три статьи Л. де Бройля в «Докладах Французской Академии наук» 1923 г.**

В истории квантовой механики работы де Бройля, в которых впервые были сформулированы и получили развитие идеи корпускулярно-волнового дуализма, занимают особое место. А. Пайс называет переходным периодом то время, когда «волны материи обсуждались лишь группкой физиков, а механика волн материи еще не была создана» [118, с. 398]. Этот период начался в сентябре-октябре 1923 года, когда были напечатаны три, небольшие по объему, сообщения Л. де Бройля в докладах Французской академии наук. Де Бройль сам назвал их «отправной точкой для создания волновой механики» [14, с. 349]. Окончание переходного периода в январе 1926 г. можно связать с опубликованием первой работы Э. Шредингера по волновой механике.

Первая статья де Бройля называлась «Волны и кванты» и была опубликована 10 сентября 1923 г. Через две недели была опубликована вторая небольшая статья «Кванты света. Дифракция и интерференция» и, наконец, 8 октября 1923 г. - третья статья «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма» (русский перевод статей [24,

26, 28]). В журнале «Nature» в 1924 г. де Бройль опубликовал также небольшую заметку, представляющую изложение одного из вопросов его диссертации, касающегося объяснения эффекта Доплера с помощью фазовых волн [236]. В феврале 1924 г. в журнале «Philosophical Magazine» де Бройль опубликовал на английском языке статью «Предварительная теория световых квантов», обобщающую его три более ранние статьи [235]. Таким образом, теория, предложенная де Бройлем, была известна не только на французском языке, но и на английском и даже на русском языках (реферат Френкеля в УФН, 1924 г. [176]). Но, следует признать, что эти три статьи де Бройля не привлекли внимание широкого круга физиков, до того момента пока не состоялась защита диссертации. По воспоминаниям Луи де Бройля, он начал писать диссертацию сразу же после опубликования трех статей в «Comptes Rendus de l'Academie des Sciences» (еженедельные доклады Французской академии наук) в сентябре-октябре 1923 г. Надо отметить, что эти статьи к публикации представлял Ж. Перрен, который через год подписал в отзыве на диссертацию: «Диссертация блестяще защищена. Оценка очень высокая» (перевод отзыва на диссертацию Л. де Бройля дан в прил. 1).

В статьях, предшествовавших диссертации, можно увидеть предрасположенность де Бройля к решению фундаментальных проблем, какой являлась задача создания синтетической теории света и обобщение ее на все частицы материи. Читая статьи, можно оценить, насколько революционными были мысли и рассуждения де Бройля. В первой же статье он излагает основные соображения о переносе волновых представлений на вещество. Для этого он настаивает, что квант света должен рассматриваться как частица очень малой массы ( $<10^{-50}$  г), движущаяся со скоростью близкой к скорости с, которую де Бройль называет предельной скоростью в теории относительности. Придав световым квантам массу, де Бройль смог подойти к решению фундаментального вопроса, поставленного А. Пуанкаре еще на Сольвеевском конгрессе в 1911 г.: «Можно ли создать соответствующую динамику квантов?». Де Бройль считал, что кванты света и частицы материи не являются противоположными сущностями, они едины по сути, и должны описываться единым образом, т.е. должно существовать единое для всех частиц динамическое описание.

Идея о существовании ненулевой массы у фотона является одной из центральных в теории де Бройля. Но именно она была отброшена всеми физиками. Начиная с момента публикации теории де Бройля на английском языке в 1924 г., не было ни одной работы, в которой теория де Бройля рассматривалась бы, без оговорок на неприятие  $m_0$  для фотона. Первая такая попытка доказать, что  $m_0$  не существует, была сделана В. Андерсоном (Wilhelm Anderson) в том же 1924 г.

[216]. Он рассмотрел следствие, которое вытекает из принятой де Бройлем формулы:

$$h\nu = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Из нее следует, что

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{h^2 \nu^2}}$$

или

$$\nu = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{h^2 \nu^2}}.$$

Андерсон пишет: «Давайте возьмем осциллятор с периодом  $T = 726^{2/3}$  секунды и подставим в формулу де Бройля  $m_0 = 10^{-50}$ ,  $c = 3 \cdot 10^{10}$ ,  $h = 6,54 \cdot 10^{-27}$ , и  $\nu = 1/T = 1/726^{2/3} = 3/2180$ , и в результате получим  $\nu = 0$ . Скорость волн равна нулю! Наш осциллятор не может испускать электромагнитные волны! А также индукционный эффект в трансформаторе переменного тока с периодом  $T = 726^{2/3}$  сек должен быть равен нулю. Было бы интересно проверить это экспериментально» [216, с. 873].

Представляет интерес ответ де Бройля на эту заметку: «В недавнем номере журнала *Philosophical Magazine* г-н Андерсон утверждал, что есть любопытное следствие, которое совсем не следует из моих рассуждений. Я считаю, что квант энергии, излученный изолированно, может рассматриваться только как излучение очень высокой частоты (справедлив закон Вина). Для излучения средних и низких частот мы должны принять концепцию объединения квантов света. Эта идея, высказанная в форме закона Планка, позволила бы нам представить некий переход от квантов света к теории электромагнетизма и избежать вывода, сделанного Андерсоном» [236, с. 51-52].

Мы еще вернемся к вопросу о бесконечно малой массе фотона, которую впервые де Бройль ввел в 1922 г. в статье «Излучение абсолютно черного тела и кванты света» [29, с. 188]. При всей неоднозначности этого вопроса, идея считать кванты света релятивистскими частицами, имеющими массу покоя, с эвристической точки зрения является важным моментом в развитии теории де Бройля.

На пути создания новой теории можно отметить статьи М. Бриллюэна, где он предлагал гидродинамическую модель колеблющегося атома, и пытался связать периодическое движение частицы в упругой среде с боровской моделью атома и объяснить, таким образом, оптические свойства атома [250]. В исследовании Джеммера приводятся слова де Бройля: «Я знал эту историю... Да, конечно, она играет некоторую роль во всем...» [53, с. 238]. Там же, по признанию де Бройля,

М. Бриллюэн называется «истинным предшественником волновой механики».

Первое уравнение, с которого начинается новая динамика квантов, неожиданно по своей простоте. Де Бройль приравнял два хорошо известных уравнения Планка и Эйнштейна:  $h\nu_0 = m_0c^2$ . В статье «Волны и кванты» после утверждения, что внутри любого тела, обладающего массой  $m_0$ , происходит некий колебательный процесс с частотой  $\nu_0 = m_0c^2/h$ , де Бройль рассматривает еще две частоты, связанные с движущимся телом. Частота  $\nu_1$  соответствует измерениям частоты внутреннего колебательного процесса неподвижным наблюдателем, который воспринимает его замедленным  $\nu_1 = \nu_0\sqrt{1-\beta^2}$ . Полная энергия движущегося тела для неподвижного наблюдателя соответствует частоте  $\nu$ :  $\nu = \nu_0 / \sqrt{1-\beta^2}$ . Эти три частоты, приписанные одному и тому же телу, при поверхностном чтении статьи вызывают некую сложность и путаницу. Сложным был и процесс согласования этих разных частот для де Бройля. Различие частот  $\nu$  и  $\nu_1$  определило дальнейшее развитие концепции де Бройля. Здесь большую роль сыграло его образное мышление. Он представил себе, что вместе с периодическим процессом, происходящим внутри частицы (тела), в пространстве возникает волна с частотой  $\nu$ . Эта волна сопровождает тело, которое движется со скоростью  $v = \beta c$ . Распространяющиеся в пространстве колебания с частотой  $\nu$  он называет «искусственной волной» или «фиктивной волной», фазовая скорость этих волн равна  $c/\beta$ .

В создании физической теории, писал Эйнштейн, «существенную роль играют фундаментальные идеи. Физические книги полны сложных математических формул. Но началом каждой физической теории являются мысли и идеи... Идеи должны позднее принять математическую форму количественной теории, сделать возможным сравнение с экспериментом» [197, с. 225]. До экспериментального подтверждения волн де Бройля, которые он ввел в 1923 г., пытаясь сохранить идею внутреннего периодического процесса, свойственного любой материальной частице, было еще далеко. Но очевидным успехом идеи фазовых волн уже в первой статье явилось физически ясное в терминах траектории частицы объяснение полуклассического квантового постулата Бора о стационарных орбитах в атоме. Используя понятие фиктивной волны, де Бройль показал, что «траектория электрона устойчива лишь тогда, когда при встрече фиктивной волны с электроном их фазы одинаковы... это условие стабильности то же самое, что и условие стабильности теорий Бора и Зоммерфельда».

Основные идеи первой статьи 1923 г, которая насчитывает всего три страницы, явились ключевыми идеями будущей концепции Л. де Бройля. Можно выделить следующие положения этой статьи:

1. Не существует различий между квантами света и любыми другими частицами, например, электронами.

2. Для всех частиц применимы постулаты и положения специальной теории относительности.

3. Все частицы обладают ненулевой массой покоя и их скорости меньше скорости  $c$ , которая согласно СТО является предельной скоростью.

4. Для всех частиц можно применить соотношения  $E = h\nu$  и  $E = mc^2$ .

5. Все частицы обладают внутренними колебаниями, частота которых определяется как  $\nu_0 = m_0c^2/h$ .

6. Движение любой частицы ассоциировано с распространением волны с фазовой скоростью  $V = c/\beta$  и частотой  $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ .

7. Колебания частиц и колебания сопровождающей их волны находятся в одинаковой фазе.

8. В случае движения по замкнутой траектории, движение будет стабильным, если на длине траектории укладывается целое число длин фазовых волн.

Первая статья де Бройля носит тезисный характер, в ней обещаются «важные результаты, которые вскоре будут опубликованы». Заключительная фраза статьи: «С сегодняшнего дня мы уже в состоянии объяснить явления дифракции и интерференции, учитывая кванты света» демонстрирует уверенность автора, и предполагает продолжение публикаций. В следующих двух статьях де Бройль показывает применение введенных им волн, которые он называет далее фазовыми волнами, для решения разных задач: дает физическое объяснение круговых стационарных орбит в атоме Бора, вводит элементы квантовой статистики, объясняет явления интерференции и дифракции.

Вторая статья де Бройля начинается с уточнения понятия нематериальной фиктивной волны, ассоциированной с движением тела. Здесь впервые де Бройль вводит термин «фазовая волна». Он пишет: «Оставляя в стороне физический смысл этой волны (объяснение этого смысла будет трудной задачей для расширенной теории электромагнетизма), напомним, что движущееся тело имеет ту же внутреннюю фазу, что и область волны, находящаяся в той же точке. Назовем эту волну фазовой» [26, с. 196]. Вся дальнейшая статья построена на допущениях и рассуждениях, в ней присутствуют такие слова как: «Кажется необходимым изменить принцип инерции», «мы, таким образом, думаем, что фазовая волна управляет переносом энергии», «Размышляя об этом, увидим, что предлагаемый синтез кажется логическим завершением сравнительного развития динамики и оптики с

XVII века». Эта в высшей степени умозрительная работа де Бройля, построенная на гипотезах и размышлениях, доказывает, что без таких работ не рождаются новые идеи и теории, что они составляют неотъемлемую часть физики.

Во второй своей статье де Бройль вводит понятие «новая динамика» для движущихся тел. Де Бройль пишет: «Кажется необходимым изменить принцип инерции». Он предлагает рассматривать в каждой точке траектории движение свободного тела вдоль луча соответствующей фазовой волны, т.е. вдоль перпендикуляра к поверхностям равной фазы волны. Де Бройль формулирует основной принцип новой динамики: «Новая динамика свободной материальной точки выступает по отношению к прежней динамике (включая динамику Эйнштейна) так же, как волновая оптика по отношению к геометрической оптике». Здесь же де Бройль дает объяснение возникновения интерференционной картины, что до сих пор вызывало затруднения при использовании понятия квантов света. Теперь это интерференционная картина фазовых волн. Де Бройль пишет: «Квант света, испущенный по какой-либо причине из точечного источника, попадая на соседние атомы, своей фазовой волной вызовет другие акты излучения квантов, при этом внутренние колебания, как мы полагаем, находятся в фазе с самой волной. Все испущенные световые атомы будут иметь, таким образом, ту же фазовую волну, что и первый атом» [Там же, с. 197].

В третьей статье рассмотрены статистические свойства газа, атомы которого обладают волновыми свойствами. Де Бройль рассматривает атомы, как излучение, заключенное в полости, и вместо атомов подсчитывает число волн: «Состояние газа может быть стабильным, только если волны, соответствующие всем атомам, образуют систему стационарных волн» [28, с. 198]. Работа С.Н. Бозе, в которых он получил формулу Планка, рассматривая излучение как «квантовый» или «световой» газ, появилась летом 1924 г. [6]. Идея рассматривать газ, состоящий из квантов, методами из кинетической теории газов принадлежит М. Планку и В. Нернсту. А идея рассматривать газ, как систему фазовых волн, принадлежит Л. де Бройлю. Годом раньше, чем Бозе, де Бройль с помощью фазовых волн нашел выражения для числа стационарных волн, содержащихся в единице объема такого квантового газа, в некотором интервале частот. Здесь де Бройль показал, что формула, полученная им с помощью фазовых волн, совпадает с законом Максвелла для идеального газа и с формулой Планка для световых атомов. Этот способ станет основой квантовой статистики, и к уточнению ее он вернется в последней главе своей диссертации.

Таковы основные положения трех статей Л. де Бройля, в которых он предложил концепцию волн, сопровождающих движение лю-

бых материальных частиц. В более развернутом виде эта концепция будет изложена в его докторской диссертации.

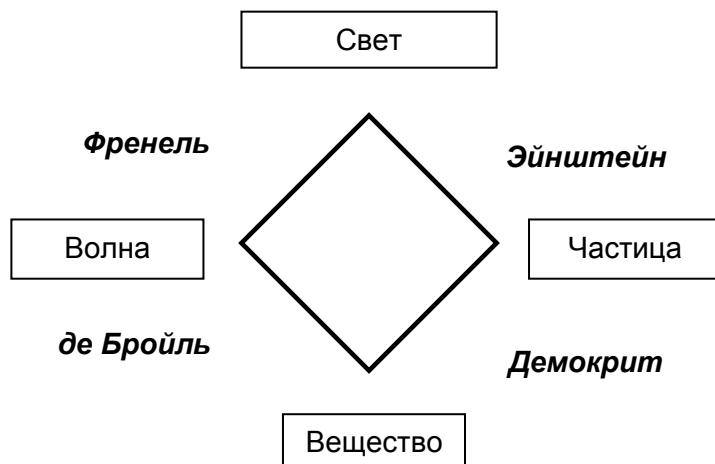
## **2.2. Проблема корпускулярно-волнового дуализма света**

Корпускулярно-волновой дуализм является основой современных представлений о физическом мире. Согласно квантовой механике, любая частица, например, электрон, это одновременно и элементарная частица, и элементарная (одночастичная) волна. «Причем, в отличие от обычной волны, которая является периодическим движением колоссального числа частиц, элементарная волна – это новый, неизвестный ранее вид движения индивидуальной частицы» [114]. Современным понятием, описывающим излучение, является квантованное поле, которое объединяет в себе как признаки волны, так и признаки частицы, и подчеркивает равноправность поля и вещества. Вещество и поле – равноправные формы материи. Как вещество может переходить в поле, так и поле переходит в вещество. Процесс излучения представляет собой превращение вещества в поле, обратный процесс – это поглощение. При взаимных превращениях вещества в поле и наоборот состояния обоих изменяются при выполнении определенных законов сохранения, число которых становится все больше и больше, так как современная техника эксперимента позволяет количественно оценивать все новые и новые стороны и свойства вещества и поля.

Истоки современных представлений о дуализме материи берут свое начало в работах Л. де Бройля, написанных в 1923–1924 гг. Основным уравнением, из которого вытекала идея де Бройля о волнах, соответствующих движению частиц, было уравнение, впервые записанное де Бройлем:  $h\nu = mc^2$ . До этого момента существовал постулат Планка о том, что энергия излучения имеет дискретный характер, и что наименьший квант этой энергии равен  $E = h\nu$ . Позже Эйнштейн, как известно, в теории относительности получил связь между массой и энергией в виде  $E = mc^2$ . В результате размышлений о природе света и вещества де Бройль поставил равенство между этими двумя видами энергии, и, таким образом, создал теорию, в которой движение микрочастиц представлялось на языке волн. В своих лекциях, прочитанных в 1927-1928 гг. в Венском университете, А. Гааз (1884-1941 гг.) подчеркивал громадную заслугу Л. де Бройля, которая заключается в том, что он обратил внимание на соотношения классической механики, волновой теории света и теории относительности и создал новую волновую механику: «Луи де Бройль обратил внимание на всю важность этих соотношений, на которые раньше почти не обращали внимания; таким образом, он явился создателем новой теории, которая оказала величайшее влияние на все дальнейшее развитие физики»

[43, с. 16]. В литературе 1920-х гг. эту новую механику, как правило, называли волновой механикой Шредингера - де Бройля, но вскоре после того, как была показана идентичность волновой механики и матричной механики, это подчеркивание имен утратило свой смысл.

Фундаментальная аналогия между светом и веществом лежит в основе волновой механики. Представление о корпускулярно-волновом дуализме материи, которое было впервые развито в работах Л. де Бройля 1923-1924 гг., уходит своими корнями к дуализму света. Л. де Бройль хорошо знал многовековую историю развития представлений о свете, и эта проблема притягивала его в силу особенностей мышления, склонного к решению фундаментальных проблем. «История теорий света – это одна из увлекательнейших областей истории физики. Именно здесь многовековая борьба корпускулярной и волновой теорий проявилась как борьба противостоящих гипотез, каждая из которых подтверждалась экспериментами, отражая лишь часть действительности, и показала, как прогресс науки часто достигается в результате синтеза двух противоположных точек зрения» - писал де Бройль [30, с. 7].



*Рис. 5. Квадрат материя-форма [319, с. 44]*

На рис. 5 изображен квадрат, представленный в статье Б. Витона (B. Wheaton) [319, с. 44], в противоположных вершинах которого находятся виды материи: излучение (свет) – вещество, а также формы их существования: волна – частица. В вершинах квадрата стоят имена ученых – Демокрит, Френель, Эйнштейн, которые внесли свой вклад в понимание форм существования двух противоположных видов материи. Де Бройль был последним звеном – ученым, который открыл фундаментальную связь волновых процессов и движения материальных частиц вещества. Председатель Нобелевского комитета по физике К.В. Озен при вручении Нобелевской премии Л. де Бройлю в 1929 г. сказал: «Де Бройль открыл совершенно новый аспект природы материи, о котором ранее никто не подозревал. Блестящая догад-

ка де Бройля разрешила давний спор, установив, что не существует двух миров, один – света и волн, другой – материи и корпускул. Есть только один общий мир» [170, с. 368].

Решение одной из проблем теории света, создание синтетического представления о свете – корпускулярно-волнового, привело самого де Бройля к дальнейшему углублению теории света, развитию «теории фотона» [244-247]. В 1940-1942 гг. он опубликовал свои исследования под названием «Новая теория света» [246]. Приступая в 1937 г. к теории света, описывающей структуру и поведение фотона, как физической реальности, де Бройль писал: «И эта долгая история еще не закончена, так как теория света, после того как сильно способствовала появлению новых дуалистических теорий материи, сегодня отстает от них и несомненно будет меняться и эволюционировать» [30, с. 7].

Диссертация де Бройля «Исследования по теории квантов» начинается с обширного исторического введения, посвященного различным представлениям о природе света. Первые научные представления о свете в период с 1620-1670 гг. связаны с именами В. Снеллиуса и Р. Декарта (открытие законов отражения, преломления света), Р. Бартолини (двойное лучепреломление), И.Ньютона (разложение белого света, интерференционные кольца) и этот ряд можно продолжить. Две противоположные точки зрения были изложены Х. Гюйгенсом в «Трактате о свете» и Ньютоном в «Трактате по оптике». В одном изложении свет рассматривался как упругое распространение волн, в другом, как поток корпускул. Т. Юнг в работе «Теория света и цветов» писал: «свет – это либо излучение светящимися телами очень малых частиц, которые испускаются на самом деле и продолжают двигаться со скоростью, обычно приписываемой свету, либо возбуждение волнового движения, аналогичного звуковым колебаниям» [215, с. 457]. Эксперименты говорили убедительно о волновой природе света, но при этом не исключали возможность того, что свет может быть и корпускулярен, и две концепции при этом мирно сосуществовали.

«Гюйгенс склонялся к волновой теории света, но Ньютон, чувствуя в основных законах геометрической оптики глубокую аналогию с созданной им динамикой материальной точки, развил корпускулярную теорию света, так называемую теорию испускания»- писал де Бройль [23, с. 254]. Де Бройль считал, что Ньютон, не высказываясь прямо о природе света, был сторонником концепции «гранулярной» структуры света. «Для него световой луч – это, прежде всего, траектория некоторой частицы» - писал о представлениях Эйнштейна де Бройль [241, с. 4]. В ряде историко-научных исследований доказывается, что Ньютон отстаивал корпускулярную теорию света, хотя и не отрицал волновой гипотезы, эта точка зрения рассмотрена в исследованиях [141,

37]. На вопрос о том, было ли представление о корпускулярно-волновом дуализме света у Ньютона, и можно ли говорить, что Ньютон в какой-то степени предвосхитил идею корпускулярно-волнового дуализма авторы исследования [141] отвечают отрицательно. Де Бройль, рассматривая состояния лучей, которые Ньютон называл состояниями «легкого прохождения» и «легкого отражения», усматривал в них «предвидение волновой механики» [241, с. 5]. «Свет находится,- писал Ньютон,- в состоянии приступов легкого отражения и легкого прохождения и до падения на прозрачные тела. И, вероятно, он получил такие приступы при первом испускании от светящихся тел, сохранив их во времени всего своего пути» [113, с. 46]. Де Бройль обращает внимание на то, что Ньютон не мог не заметить, что окрашивание в наблюдаемых им кольцах требует существования у света элемента периодичности, которой нет в корпускулярной картине. И находит у Ньютона определение «длины приступа» - расстояние в пространстве между двумя «приступами», когда корпускулы света, проходя через вещество, сопровождаются «волнениями». «Длина приступа» - это то, что в дальнейшем приобретет смысл длины волны монохроматического света. Лошак пишет, что де Бройль настаивал на том, что внутренняя частота была введена уже Ньютоном в частицы света через гипотезу приступов отражения и прохождения света [294, с. 24]. После Ньютона корпускулярная теория света надолго утвердилась в физике. Лишь в трудах Ж.Б. Био и П.С. Лапласа можно увидеть некоторое предвосхищение идеи корпускулярно-волнового дуализма, которое «имело грубый механический характер», пишут в своей статье Б.И. Спасский и Е.Е. Куканова [141].

Начало XIX в. связано с открытиями явлений интерференции света - опыты Т. Юнга и поляризации – Э.Л. Малюса. Благодаря работам Френеля, с 1815 г., за десять лет «оптика была преобразована», об этих преобразованиях пишет Г.С. Ландсберг в своей статье [98]. Френель, соединив принцип Гюйгенса с принципом когерентности, получил математическое описание дифракции и с помощью своего метода доказал прямолинейность распространения света, тем самым утвердив волновую теорию света [98, 166]. После обобщения Мак-свеллом результатов предшественников и создания теории электромагнетизма, вся оптика стала рассматриваться как часть электромагнетизма, а световые волны как электромагнитные.

Любые корпускулярные свойства света были забыты вплоть до 1905 г., когда появилась статья Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения...». Она, писал де Бройль, «вновь восстановила корпускулы в структуре света и снова поставила в острой и малопонятной форме вопрос дуализма волн и частиц» [241, с. 10]. Де Бройль, обращаясь к истории науки о свете, во введении к своей диссертации

обосновал необходимость создания новой синтетической теории, объединяющей волны и частицы. При этом, он отмечал, что новая теория будет «без сомнения, несколько аналогичной теории приступов Ньютона» [23, с. 323].

Концепция дуализма света неявно присутствовала в работах Эйнштейна «К современному состоянию проблемы излучения» и «О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения», написанных в 1909 г. [202, 203]. Основное внимание Эйнштейна было направлено на утверждение законности корпускулярного описания излучения. Световые кванты, которые он ввел в 1905 г., отражали только одну сторону излучения - его дискретность. На этом пути утверждения дискретности излучения существовал ряд вопросов, ответы на которые еще предстояло найти. Многие ученые признавали проблему формулы флукутации энергии, полученной Эйнштейном, как аномалию, требующую своего решения. Сам Эйнштейн говорил о своей формуле как о «неразрешимой загадке» [202, с. 295], которую еще надо решить.

В период 1905-1924 гг. появился ряд работ, в которых в духе Эйнштейновской теории световых квантов, рассматривалось распределение плотности излучения энергии и вносились уточнения в саму теорию квантов света. В работе Ю.А. Круткова [81] уточнялась гипотеза Эйнштейна о независимых атомах света, он считал, что гипотеза требовала модификации. Важная роль принадлежит работам П. Эренфеста, опубликованным в 1911-1916 гг., в которых он дал четкий анализ квантовой гипотезы Планка, сопоставив ее с квантовой теорией света Эйнштейна [180], в это же время А.Ф. Иоффе предложил существование «ассоциаций» квантов света, которое было названо «световыми молекулами» [179]. Для того, чтобы почувствовать атмосферу тех лет «квантового перепутья», когда только утверждалась квантовая теория, чтобы впоследствии проложить дорогу квантовой механике, можно обратиться к обзору Ю.А. Круткова «О теории квантов», опубликованному в 1916 г. в «Журнале физико-химического общества» [80]. Он писал о том, что за 15 лет теория квантов дала много успешных результатов, среди которых теория теплоемкости твердых тел, начатая Эйнштейном и продолженная в работах Дебая, Борна и Крамерса, модель атома Бора. Но, несмотря на это, «сама теория квантов продолжает оставаться ветвью, насищенно привитой к древу классической статистической физики, теорией формальной, статистической, а не физической» [80, с. 43]. Об этих работах Круткова, также как и его учителя Эренфеста, В.Я. Френкель писал: «В новом здании квантовой механики они существуют в виде своеобразных «скрытых параметров», они были теми строительными лесами, от которых освободился фасад этой теории, когда ее построение было завершено» [179, с. 644].

### **2.3. Эмпирические результаты по исследованию природы света**

Чтобы понять истоки квантовой теории света, разрабатываемой на протяжении 1905-1925 гг., необходимо обратиться к многочисленным эмпирическим попыткам, предпринятым в конце XIX – начале XX века, которые были связаны с исследованиями структуры света. В этих экспериментальных исследованиях выделяются два направления: фотоэффект и рентгеновские лучи. Рассмотрим связь между экспериментальными фактами и их интерпретациями, которая, в конечном счете, привела к утверждению корпускулярно-волнового дуализма как фундаментального принципа природы.

Явление фотоэлектрического эффекта было открыто в 1887 г. Г. Герцем, затем последовали систематические исследования этого явления А. Столетовым в 1888-1890 гг. В 1899 г. Дж.Дж. Томсон и Ф. Ленард независимо друг от друга показали, что с металлической поверхности, облученной ультрафиолетовым светом, вырываются отрицательные электроны. Число освобожденных электронов пропорционально интенсивности падающего света, начальная скорость электронов не зависит от интенсивности света, но зависит от его частоты. В 1898 г. Э. Резерфорд измерил скорость этих носителей. Установленные эмпирическим путем законы фотоэффекта говорили следующее. Поскольку световая волна от источника расходится во все стороны, то по мере ее распространения плотность энергии на фронте волны должна уменьшаться. Но эксперимент показал, что энергия выбитых фотоэлектронов при этом не уменьшается. Каждый выбитый электрон обладает той же энергией, а с увеличением расстояния между пластиной и источником уменьшается лишь число таких электронов. Фотоэффект можно наблюдать в газах и парах при достаточно высокой частоте падающего излучения, а также в случае отдельных атомов при использовании рентгеновских лучей и камеры Вильсона [166]. Этот эффект, по своей физической сути, представляет собой ионизацию, и закон о пороговой частоте превращается в утверждение о том, что ионизация требует, чтобы энергия падающего фотона была не меньше энергии ионизации рассматриваемого атома или молекулы. Фотоэлектрический эффект нельзя объяснить в рамках классической физики. Она предполагает наличие временного запаздывания - инерционность, которая обусловлена необходимостью накопления достаточного количества энергии излучения. В случае фотоэффекта инерционность отсутствует.

Именно на этом уровне находилось знание о фотоэлектричестве, когда в 1905 г. появилась статья Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» [198]. Эйнштейн утверждал, что это излучение состоит из порций энергии. Когда одна такая порция, или фотон, падает на металл, по-

следний может ее поглотить и высвободить фотоэлектрон. Энергия частицы одна и та же на любом расстоянии, она зависит только от частоты колебаний. Но о каких колебаниях идет речь, если свет состоит из частиц? «Здесь мы сталкиваемся с самой тяжелой апорией физики XX века, содержащейся в выдвинутой Эйнштейном теории световых квантов. Существование электромагнитных волн и волновая природа света не могут быть опровергнуты. Вместе с тем нельзя опровергнуть корпускулярную природу света. Неотъемлемое противоречие вошло в науку» - заключение, к которому приходит Б.Г. Кузнецов [86, с. 109]. Лишь через 20 лет объяснение этого противоречия было получено с помощью новой теории – квантовой механики.

Все количественные характеристики фотоэффекта можно описать на основе закона Эйнштейна, согласно которому максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов задается соотношением  $(R/N)\beta v - P$  или в современных обозначениях  $hv - P$ , где  $P$  – работа выхода электрона из металла. Уравнение фотоэффекта, полученное Эйнштейном, было экспериментально подтверждено в 1912 г. А. Хьюзом [280], а также О. Ричардсоном и А. Комptonом [321]. А в 1916 г. серию экспериментов по проверке уравнения Эйнштейна завершил Р.Э. Милликен [309].

История открытия дуализма света также, не в меньшей степени, связана с впервые полученными в 1895 г. К. Рентгеном лучей, названных в его честь рентгеновскими (их называли также Х-лучами). В исследовании Витона показано, что экспериментальные факты, связанные с свойствами Х-лучей, сыграли более значительную роль для восприятия физиками теории дуализма, чем существовавшие экспериментальные факты с использованием видимого света [330].

Еще в 1903 г. Дж.Дж. Томсон встретился с трудностями количественного объяснения ионизации, создаваемой Х-лучами, и он тогда предположил существование «сгустков энергии» [327]. Вскоре они были интерпретированы как электромагнитное излучение с короткой длительностью цуга волн. При прохождении рентгеновского излучения через вещество с его поверхности вырываются так называемые вторичные электроны. Исследования Ч.Г. Баркла в 1908 г. установили, что вторичные рентгеновские лучи, испускаемые химическим элементом, находящимся под действием первичных рентгеновских лучей, можно подразделить на несколько групп. Каждый химический элемент излучает характерный линейчатый спектр рентгеновских лучей. Причем с возрастанием атомной массы элемента каждая линия смещается к более жесткому концу спектра. Эти группы получили обозначения  $K$ ,  $L$  и  $M$ -серий. Первые работы Л. де Бройля в лаборатории брата, в которых он анализировал имеющиеся экспериментальные факты, связанные с изучением этих серий, они назывались: «О вычислении гра-

ничных частот  $K$  – и  $L$  – полос поглощения тяжелых элементов» и «О поглощении X-лучей веществом и о принципе соответствия» [Библиография в прил. 4].

В генезисе идеи дуализма материи важное значение имеет работа Л. де Бройля в экспериментальной лаборатории М. де Бройля. В 1908 г. М. де Бройль успешно защитил диссертацию под руководством П. Ланжевена по исследованию процессов ионизации газов и броуновскому движению. Но вскоре он изменил направление своих научных интересов, связав их с новой квантовой теорией, которая во Франции почти не имела развития. Именно М. де Бройль первым во Франции обратился к исследованиям взаимодействия вещества и рентгеновского излучения. В период с 1914 г. по 1921 г. он выполнил ряд значительных экспериментальных открытий, изучая спектры поглощения рентгеновского излучения. Аномалии, обнаруженные в спектре поглощения, являлись прямым доказательством энергетических уровней в теоретической модели атома Бора. Эксперименты М. де Бройля заключались в исследовании электронов, появляющихся с различными начальными скоростями при освещении металлической пластинки монохроматическим рентгеновским излучением. При наложении магнитного поля пучок электронов разворачивался в спектр, в зависимости от величины скорости. Этот спектр давал изображение на фотопластинке, в котором каждая линия соответствовала группе электронов с одинаковой скоростью. М. де Бройль получил «линейные спектры», характерные для каждого освещаемого металла с помощью X-лучей. Эти эксперименты с высокой точностью подтверждали внутриатомное происхождение электронов с «глубины» соответствующей энергетической орбиты  $K$ ,  $L$ ,  $M$  атомов катода:  $\omega_K = h\nu_K$ ,  $\omega_L = h\nu_L$ ,  $\omega_M = h\nu_M$ . Линии магнитных спектров соответствовали начальным энергиям таких величин  $h\nu - \omega_K$ ,  $h\nu - \omega_L$ ,  $h\nu - \omega_M$ , что подтверждало закон фотоэффекта, полученный Эйнштейном  $m\omega^2/2 = h\nu - \omega$ , где  $\omega$  – энергия, необходимая для освобождения электрона из атома.

Таким образом, Луи де Бройль в 1919 г. оказался в лаборатории брата на переднем фронте исследований электронной структуры атомов, а также свойств рентгеновского излучения. В 1920 г. М. де Бройль заметил, что рентгеновские лучи вызывают вторичные  $\beta$ -электроны, и понял потенциальную значимость  $\beta$ -лучевой спектроскопии для исследований механизма поглощения рентгеновских лучей. Эти исследования наиболее активно в лаборатории вел А. Довилье. Он изучал кинетические энергии вторичных  $\beta$ -электронов, их химическое воздействие на фотоэмulsionии. В своем обзоре по фотоэффекту Довилье особое внимание уделил вопросам химического воздействия на вещество вторичных электронов. Он утверждал, что самые быстрые электроны, испускаемые облучаемым телом, обладают

той же скоростью, что и самые быстрые электроны в катодном пучке, который вызывает рентгеновские лучи [330]. Совпадение энергий первичных и вторичных электронов говорило о том, что энергия электрона, вызванного X-лучами, не зависела от расстояний, которые проходит само рентгеновское излучение. Закономерно вставал вопрос о природе рентгеновского излучения и проблеме согласования электромагнитной и корпускулярной теории.

Вопрос о том, являются ли рентгеновские лучи корпускулами или волнами, оставался без ответа. У. Брэгг в 1911 г. опубликовал статью, интерпретируя свои эксперименты на основе корпускулярной гипотезы. Рентгеновские лучи обладают способностью сохранять свою энергию в виде маленького сгустка, не размазывая его, как это предполагает волновая теория, и передает всю эту энергию целиком одному электрону. Он сформулировал «общий принцип о том, что если в атом входит один облучающий объект (альфа-, бета-, гамма-, рентгенов или катодный луч), то появляется один, и только один, объект, несущий энергию входящего» [167, с. 44]. До 1912 г. значительная часть физиков считали X-лучи импульсами распространяющегося электромагнитного поля. Бесконечно большое число импульсов давало пучок X-лучей, который казался непрерывным. Ряд свойств рентгеновских лучей свидетельствовал об их корпускулярной природе. Во-первых, они спускались радиоактивными атомами вместе с  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучами, корпускулярная природа которых не вызывала сомнений, во-вторых, они ионизовали газ при прохождении через него. Корпускулярная гипотеза стала совместима с представлениями о рентгеновских лучах как об электромагнитных волнах после открытия явления дифракции рентгеновских лучей. М. фон Лауз понял, что если оценки длины волны рентгеновских лучей, сделанные Зоммерфельдом, дают значения порядка постоянной кристаллической решетки, то для рентгеновских лучей решетка кристалла может стать трехмерной дифракционной решеткой. В июне – июле 1912 г. эта идея получила экспериментальное подтверждение. Открытие Лауз имело большое значение: дифракционные картины позволяли определить длину волны рентгеновского излучения, а также послужили дальнейшим работам У.Л. и У.Г. Брэггов по созданию рентгеновского спектрометра для исследования структуры кристаллов.

В 1912 г. У.Г. Брэггом было сделано пророческое заявление: «Как мне представляется, проблема состоит не в том, чтобы выбрать между двумя теориями рентгеновских лучей, а в том, чтобы найти одну теорию, обладающую возможностями обеих» [226, с. 360-361]. Взгляды Брэгга разделялись и другими экспериментаторами, среди которых был М. де Броиль. М. де Броиль с сотрудниками вел исследования скоростей вторичных катодных лучей, образующихся в ре-

зультате падения первичных катодных лучей на металлическую пластиночку. Скорость вторичных катодных лучей не зависела ни от расстояния между пластинами, ни от интенсивности первичных катодных лучей. По порядку величины она была такая же, как и у первичных лучей. В обсуждении принимал участие и Л. де Бройль. Эксперименты рождали уверенность в том, что процесс возникновения рентгеновского излучения в первой пластинке и образования вторичного катодного луча во второй пластинке являются взаимно обратными процессами.

При участии брата Морис де Бройль сфокусировал исследования в своей лаборатории на вопросах боровской модели атома и достиг в этом направлении определенных успехов, о которых он докладывал на Третьем Сольвеевском конгрессе в 1921 г. Витон [330, 331] показал, что группа М. де Бройля сыграла выдающуюся роль в исследованиях фотоэффекта с использованием X- и γ-лучей, и эти исследования послужили важным источником дальнейших теоретических представлений Л. де Бройля.

Интересно появление, заложенной Дж.Дж. Томсоном в 1903 г., концепции игольчатого излучения, к которой позже обратился Эйнштейн, и дал ей развитие. Известный факт, что при прохождении рентгеновского излучения через газы происходит ионизация, вызывал вопрос: почему расщепляется только малая доля молекул, ведь условия во фронте волны одинаковы, и, таким образом, все молекулы газа находятся в одинаковых условиях? Томсон отвечал на этот вопрос так: «Трудность объяснения малой степени ионизации устраняется, если вместо того, чтобы считать волновой фронт рентгеновского излучения однородным, мы допустим, что он состоит из «крупинок» большой интенсивности, разделенных значительными интервалами, интенсивность которых очень мала» [327, с. 258]. Концепция игольчатого излучения состоит в том, что в элементарном процессе излучения света оно распространяется неравномерно, концентрируется в определенных направлениях. Но так же как и квантовый принцип излучения, эта теория не позволяла объяснить интерференцию света, которая наблюдалась даже при прохождении столь слабого света, когда можно считать кванты света, проходящими поодиночке в установке для наблюдения этого явления.

#### **2.4. Зарождение квантовой теории света**

До появления в 1905 г. статьи Эйнштейна «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» понятие элементарных порций энергии, квантов, считалось применимым лишь к взаимодействию между веществом и излучением: должен существовать осциллятор с частотой  $v$ , который может испускать и поглощать энергию только частями, кратными  $hv$ . Эйнштейн же в своей статье утверждал, что энергетическая характеристика света имеет

корпускулярную (квантовую) структуру. М. Джеммер пишет, что по важности для будущего развития теоретической физики эту статью можно сравнить с классической работой Эйнштейна по специальной теории относительности [53, с. 39]. Де Бройль высоко ценил эту работу Эйнштейна и о ее значении писал следующее: «Гениальная маленькая заметка Эйнштейна была как удар грома в почти безмятежном небе, и кризис, который она породила, и сейчас спустя полвека не закончился. Значение революции, которую совершил Эйнштейн в теоретической физике, ни в чем не уступает той, которую вызовет несколько месяцев спустя его первая большая работа по теории относительности. Нобелевский комитет не ошибся, присудив ему Нобелевскую премию не за открытие теории относительности, а за интерпретацию закона фотоэффекта» [241, с. 11].

Об этой работе часто говорят как о статье по фотоэффекту, но в ней обсуждались такие вопросы, как теория излучения абсолютно черного тела, энтропия излучения, вопросы об ионизации газов ультрафиолетовым светом и, в том числе, фотоэффект - «возбуждение катодных лучей при освещении твердых тел». И все эти вопросы рассматривались с точки зрения дискретного распределения света по пространству с помощью световых квантов или фотонов, как их позже в 1926 г. назовет Г.Н. Льюис [298].

М. Джеммер пишет, что Эйнштейн по-видимому не знал, что похожие мысли о дискретной структуре излучения высказывал ранее Дж.Дж. Томсон, когда он встретился с затруднениями при объяснении ионизации, создаваемой рентгеновскими лучами. Он приводит слова Томсона: «энергия не распределена равномерно... распределение энергии характеризуется тем – как будто у нее существует структура, хотя и крайне мелкая,- что есть места, где энергия велика, которые чередуются с местами, где она мала, как чередуются в стене кирпичи и раствор» [53, с. 44].

Эйнштейн в самом начале статьи выдвигает следующее предположение: «...энергия пучка света, вышедшего из некоторой точки, не распределяется непрерывно во все возрастающем объеме, а складывается из конечного числа локализованных в пространстве неделимых квантов энергии, поглощаемых или возникающих только целиком» [198, с. 93]. Эта идея была прямо противоположна господствовавшей волновой электромагнитной теории света к началу XX века. М. Борн писал, что неявно в работе Эйнштейна 1905 г. уже содержался дуализм волна-частица [12, с. 126]. Но только неявно, этой точки зрения придерживается и А.Б. Кожевников [76]. В работе Эйнштейна еще не содержалось того, что позже назовут корпускулярно-волновым дуализмом или принципом дополнительности. В ней не рассматривался вопрос о сосуществовании волн и частиц на одном онтологическом уровне.

ском уровне. Эйнштейн пишет, что волновая теория света, основанная на непрерывном распределении энергии в пространстве, согласно теории электромагнитных волн Максвелла, прекрасно согласуется с оптическими явлениями и «едва ли будет заменена какой-либо иной теорией»[198, с. 92]. Но в случае, когда эту теорию применяют к явлениям возникновения и превращения света – фотолюминисценции, возникновения катодных лучей при освещении (1905 г. - эффект Комптона еще не открыт), то необходимо предположение о дискретном распределении энергии в пространстве. В этой работе Эйнштейна речь о синтезе корпускулярной и волновой, т.е. дискретной и непрерывной, точек зрения на природу излучения не идет.

Эйнштейн дает объяснение своему предположению о дискретном распределении энергии света. Аналогично подходу, примененному при решении задачи об излучении «черного тела», он рассматривает объем с идеально отражающими стенками, в котором находятся молекулы газа и свободно движущиеся электроны – резонаторы, излучающие и поглощающие электромагнитные волны определенной частоты. В условиях динамического равновесия средняя кинетическая энергия электрона-резонатора должна равняться средней кинетической энергии поступательного движения молекулы газа:

$$\bar{E} = \frac{R}{N} T,$$

$R$  - универсальная газовая постоянная,  $N$  - число молекул в грамм-моле,  $T$  - абсолютная температура. Рассматривая закон Вина, Эйнштейн показал, что излучение ведет себя как идеальный газ, состоящий из независимых друг от друга квантов энергии  $R\beta\nu/N$  ( $\beta$  - константа).

Рассматривая зависимость энтропии монохроматического излучения от объема и сравнивая ее с формулой Больцмана для энтропии, Эйнштейн получает выражение для вероятности:

$$W = \left( \frac{v}{v_0} \right)^{\frac{N E}{R\beta\nu}}.$$

Если излучение с частотой  $\nu$  и энергией  $E$  заключено в объеме  $v_0$ , то  $W$  – это вероятность того, что вся энергия излучения в заданный момент времени будет находиться в части этого объема  $v$ . Отсюда следует вывод: «монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной  $R\beta\nu/N$ » [198, с. 102]. Таким образом, пишет Эйнштейн, напрашивается вопрос, «не являются ли и законы возникновения и превращения света такими, будто свет состоит из подобных же квантов энергии» [Там же]. Гипотеза о квантах све-

та успешно применяется им для объяснения возникновения катодных лучей при освещении твердых тел светом, когда световой квант отдает всю свою энергию одному электрону. Кинетическая энергия электронов, покидающих поверхность, определяется разностью  $R\beta\nu/N - P$ , где  $P$  - работа выхода электрона. Этой формулой объясняются все экспериментальные зависимости по фотоэффекту.

Эйнштейн осознавал сам значительность этой работы, и в одном из писем он назвал свою гипотезу световых квантов «очень революционной» [268, с. 31]. Этим термином он не пользовался даже для характеристики теории относительности. Спустя много лет после того как Эйнштейн выдвинул «эвристическую точку зрения» о квантах света, в 1918 г. он написал М. Бессо, что он «думал о квантовой теории света, не продвинувшись ни на шаг» [120, с. 82]. У Эйнштейна была внутренняя уверенность в правоте своей гипотезы, но, пока ему не удалось создать ее математического описания: «В реальности квантов в излучении я больше не сомневаюсь, хотя в этом убеждении все еще нахожусь в полном одиночестве. И так буду до тех пор, пока не созреет математическая теория» [Там же, с. 82].

Вопросу о том, как идеи становятся знанием, на примере гипотезы световых квантов Эйнштейна, посвящено обширное исследование [227], в котором большое внимание уделено анализу сопротивления и неприятия известными физиками идеи световых квантов. Идея о существовании квантов света долгое время считалась фантастической, неким заблуждением Эйнштейна, не заслуживающим внимания таких физиков как М. Планк, Н. Бор, Х. Лоренц [109, 110]. Н. Бор писал: «Хотя эта точка зрения имеет большое значение для понимания некоторых классов явлений, например, фотоэффекта, с позиций квантовой теории обсуждаемая гипотеза не может все же рассматриваться как удовлетворительное решение. Как известно, именно эта гипотеза приводит к непреодолимым трудностям при объяснении явлений интерференции... Можно утверждать, что лежащее в основе гипотезы световых квантов положение принципиально исключает возможность осмыслиения понятия частоты  $\nu$ , играющей главную роль в этой теории. Поэтому гипотеза световых квантов непригодна для того, чтобы дать общую картину процессов, которая могла бы включать всю совокупность явлений, рассматриваемых при применении квантовой теории» [10, с. 518]. Вопросу отношения Бора к световым квантам Эйнштейна посвящены многочисленные исследования [221, 306, 313]. Позиция Н. Бора по отношению к проблеме структуры свободного излучения была четкой и определенной. По выражению Джеммера, она заключалась в «непреклонном неприятии эйнштейновских световых квантов» [53, с. 345]. Нередко Бору приписывается использование Эйнштейновских световых квантов уже в атомной модели 1913 г.

[282]. Но в статьях, предшествовавших формированию принципа дополнительности, Бор специально подчеркивал волновую структуру излучения, испускаемого при переходах между стационарными состояниями [10, с. 293, с. 319, с. 502].

В представлении, которое сделали Планк, Нернст, Рубенс и Варбург Прусскому министерству просвещения в связи с выборами в академию наук и рекомендацией Эйнштейна, говорилось: «Подводя итог, можно сказать, что среди больших проблем, которыми так богата современная физика, не существует ни одной, в отношении которой Эйнштейн не занял бы примечательной позиции. То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком сильно ставить ему в упрек» [12, с. 127]. Эта цитата иллюстрирует тот скепсис в отношении гипотезы Эйнштейна, который был распространенным вплоть до 1923 г., до открытия А. Комptonом явления рассеяния рентгеновских лучей на электроне.

Эйнштейн продолжал развивать идею квантов света в последующих работах 1909 г. [201-205]. В работе «К современному состоянию проблемы излучения» он рассматривает флуктуации излучения абсолютно черного тела в объеме  $V$  в состоянии термодинамического равновесия, которые подчиняются уравнению  $\bar{\varepsilon}^2 = kT^2(dE/dT)$ , где  $\bar{\varepsilon}$  - отклонение мгновенного значения энергии  $E$  с частотой  $\nu$  от среднего значения. Если применить это уравнение к закону Планка

$$E = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu,$$

то получается формула для флуктуации энергии излучения абсолютно черного тела, которая, как показал Эйнштейн, представляет собой сумму. Одно слагаемое соответствует существованию корпускул света (т.е., если бы излучение было чисто корпускулярным), а другое – существованию световых волн (т.е., если бы излучение было чисто волновым):

$$\bar{\varepsilon}^2 = \bar{E}h\nu + \frac{c^3\bar{E}^2}{8\pi\nu^2Vd\nu},$$

где  $\varepsilon = E - \bar{E}$  - флуктуация энергии  $E$  (мгновенных значений) излучения в некотором объеме  $V$ ,  $\bar{\varepsilon}^2 = E^2 - \bar{E}^2$  - среднеквадратичная флуктуация. Первый член этой формулы легко истолковывается с помощью световых квантов, они должны подчиняться тем же статистическим законам, что и молекулы в кинетической теории идеального газа. А второй член соответствует среднеквадратичной флуктуации, обусловленной интерференцией парциальных волн. Эйнштейн заметил, что эта формула для построения новой теории пока не может быть использована.

Из нее невозможно построить ни уравнения Максвелла, ни получить квантовую структуру излучения. Полученный Эйнштейном результат можно было трактовать с помощью двух совершенно разных моделей: излучение как идеальный газ частиц с энергией  $h\nu$ , или излучение как система монохроматических волн с частотой  $\nu$ . Тем не менее, поиски приемлемой модели, объединяющей обе точки зрения на природу света, обсуждались в то время, и такие попытки описаны Джеммером [53]. Кожевников писал, что «практически вся последующая история крутилась вокруг того, как получить полный результат, исходя из какого-то одного представления о структуре света» [76, с. 103].

Де Бройль писал в связи с формулой флюктуации энергии Эйнштейна: «Я когда-то много размышлял над этой любопытной формулой» [212, с. 233]. Здесь прослеживается прямое влияние, которое оказала работа Эйнштейна на де Бройля: «замечательный результат, в котором проявляется поразительным образом дуализм волн и частиц в том что касается излучения, стал объектом моих размышлений» [241, с. 12]. В 1922 г. де Бройль в Докладах академии наук публикует две статьи - «Излучение абсолютно черного тела и кванты света» и «Об интерференции и теории квантов света», в которых дает разъяснения к формуле Эйнштейна. Формулу Планка

$$E = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

с помощью представления

$$\sum e^{-nx} = \frac{1}{1 - e^{-x}}$$

де Бройль записывает как

$$E = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} (e^{-h\nu/kT} + e^{-2h\nu/kT} + e^{-3h\nu/kT} + \dots) d\nu = E_1 + E_2 + E_3 + \dots,$$

где

$$E_n = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} e^{-nh\nu/kT} d\nu.$$

Тогда формула Эйнштейна может быть преобразована к виду

$$\overline{\varepsilon^2} = \frac{8\pi h^2 \nu^4}{c^3} (e^{-h\nu/kT} + 2e^{-2h\nu/kT} + 3e^{-3h\nu/kT} + \dots) = \sum_{n=1} n h \nu E_n.$$

Де Бройль предположил, что слагаемое  $E_1$  следует считать соответствующим энергии, существующей в виде квантов величины  $h\nu$ , второе слагаемое  $E_2$  следует считать соответствующим энергии, существующей в виде квантов величины  $2h\nu$  и т.д. Таким образом, формулу Эйнштейна для флюктуаций можно получить на основе чисто корпускулярной теории света при условии, что полная энергия излучения соответствующим образом распределяется между корпускулами с различными энергиями:  $h\nu, 2h\nu, 3h\nu, \dots$  Уиттекер указывает, что годом раньше, чем де Бройль, такое же рассмотрение предложил М.

Вольфке [167, с. 161]. Кожевников в своей работе [76] указывает на похожие результаты, полученные в 1914 г. Крутковым [81]. Кожевников полагает, что эти результаты были получены Крутковым совместно с Эренфестом. В статье Круткова показано, что закон излучения Планка позволяет предположить существование квантов света не только с энергией  $h\nu$ , но и с удвоенной, и с утроенной энергией и т.д.

В статье «Об интерференции и теории квантов света» световые кванты де Бройль называет «световыми атомами», которые могут объединяться в молекулы. Далее он предположил, что подобные объединения квантов могут служить ключом к корпускулярной интерпретации явления интерференции света: «Объяснение на основе теории квантов света таких явлений, как интерференция, дифракция, рассеяние и другие, до сих пор интерпретируемых в рамках волновой теории, кажется слишком сложным. Чтобы она привела к успеху, необходимо пойти на компромисс между старой теорией и новой, вводя в последнюю понятие периодичности. Когда синтез будет произведен, уравнения Максвелла предстанут, без всякого сомнения, как непрерывное приближение дискретной структуры излучаемой энергии» [29, с. 190].

Полученную формулу для флюктуации энергии  $\bar{\varepsilon}^2 = \sum_{n=1}^{\infty} nh\nu E_n$  де

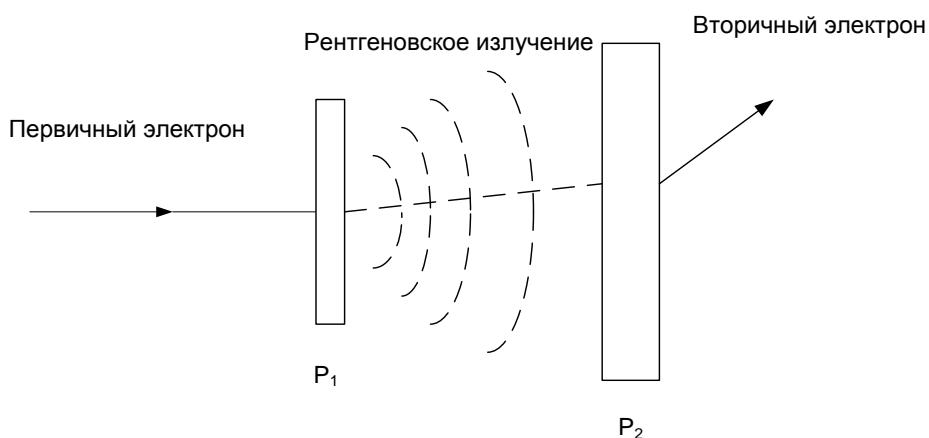
Бройль анализирует и приходит к выводу: «С точки зрения квантов света, явления интерференции кажутся связанными с существованием совокупностей атомов света, движущихся не независимо, а когерентно. Отсюда естественно предположить, что если когда-нибудь теория квантов света сможет объяснить интерференцию, она должна будет ввести в рассмотрение подобные объединения квантов» [Там же, с. 192]. В этом выводе де Бройля содержится наиболее четкое выражение корпускулярно-волнового дуализма, которое существовало на тот момент времени.

О работе Эйнштейна «Обзор современных идей о теории света» 1909 г. де Бройль пишет спустя много лет, в 1955 г., следующее: «Этот ценнейший текст очень полезен, чтобы поразмыслить над ним даже сегодня. Он четко указывает путь, которым нужно следовать, чтобы разрешить проблему волн и частиц. Но он еще далек от того, чтобы дать ясную интерпретацию явлений интерференции как результата взаимодействия между различными фотонами одной и той же волны» [241, с. 15].

В 1909 г. в Зальцбурге Эйнштейн, выступая с докладом «О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения», говорит о том, что следующий этап развития теории света будет своего рода слиянием волновой теории и «теории истечения Ньютона». Цель его последующих рассуждений состоит в том, чтобы «обосновать такое мнение и показать неизбежность глубокого изменения наших взглядов

на сущность и структуру света» [203, с. 181]. В словах Эйнштейна «теория относительности изменяет наши взгляды на природу света в том отношении, что свет выступает в ней не в связи с гипотетической средой, но как нечто существующее самостоятельно, подобное веществу» [Там же, с. 187] можно увидеть предчувствие будущего общего взгляда Л. де Бройля на свет и вещество, который впервые стал рассматривать световые частицы наравне с другими частицами вещества. Эйнштейн пишет, что в понимании структуры излучения и в представлении о распределении энергии в пространстве, теория относительности не изменила ничего, но он полагает, «что в этом аспекте проблемы мы стоим в самом начале пока еще необозримого, но, без сомнения, исключительно интересного пути» [Там же]. Этот путь в 1923 г. указал Л. де Бройль, получив как следствие теории относительности, существование фазовых волн в пространстве, распространяющихся в одной фазе с неким колебательным процессом, присущим каждой материальной частице. Эйнштейн предвидел в 1909 г. роль теории относительности в будущем решении проблемы волна-частица, а так же он выразил надежду «побудить какого-нибудь из читателей заняться рассматриваемыми вопросами» [Там же]. Таким читателем работ Эйнштейна, который воспринял идею квантов света, и создал дуалистическую концепцию света, безусловно, можно считать Л. де Бройля.

В докладе [203] Эйнштейн обосновывает аргумент в пользу существования локализованных световых квантов, используя известные законы возникновения вторичных катодных лучей под действием рентгеновского излучения. Он рассматривает пучок электронов (первичные катодные лучи), которые падают на металлическую пластинку  $P_1$ , и порождают рентгеновское излучение (рис. 6).



*Рис. 6. Схема образования вторичных катодных лучей*

Это излучение падает на вторую пластинку  $P_2$  и приводит снова к образованию электронов (вторичные катодные лучи). Эксперимен-

тально установлено, что скорости вторичных катодных лучей соответствуют скорости первичных, не зависят от расстояния между пластинаами и от интенсивности первичных электронов. Эйнштейн спрашивает, что случится, если уменьшить интенсивность первичных электронов или размер пластины  $P_1$  (область на которую они попадают), настолько, что можно будет рассматривать только один электрон? И сам отвечает: «нам придется предположить, что в  $P_2$  либо не произойдет ничего, либо последует вторичное излучение электрона со скоростью того же порядка величины, что и скорость электрона, попавшего на  $P_1$ . Другими словами, элементарный процесс излучения протекает, надо полагать, так, что он не приводит, как того требует волновая теория, к распределению и рассеянию энергии первичного электрона в распространяющейся во все стороны сферической волне. Напротив, по крайней мере, большая часть этой энергии находится, видимо, в каком-нибудь месте пластины  $P_2$ , либо где-то еще. Элементарный процесс излучения является, по-видимому, направленным» [203, с. 188].

Согласно волновой теории источник X-лучей является источником сферических волн, распространяющихся в пространстве с уменьшающейся амплитудой и достигающих вторую пластину. Но во второй пластине вся энергия X-луча должна быть сконцентрирована в окрестности единственной точки, приводящей к образованию электрона, скорость которого сравнима со скоростью первичного электрона. Эйнштейн делает вывод: «Итак, структура излучения представляется иной, чем можно заключить из нашей волновой теории» [Там же, с. 189]. Свойства света, которые нельзя понять с точки зрения волновой теории, помогает понять забытая теория истечения Ньютона [96, 105]. Согласно Ньютону, энергия, сообщенная при испускании частице света, не рассеивается по бесконечному пространству, а сохраняется вплоть до того момента пока не произойдет акт поглощения.

В книге О. Хвольсона «Физика наших дней», изданной в 1928 г., обсуждаются вопросы, которые после изучения новых экспериментальных фактов, встали перед будущим создателем теории, претендующей на объяснение этих фактов: «Каким образом кванты, несомненно испускаемые телом А, превращаясь в электромагнитное колебательное движение, как бы развертываются в волновые поверхности? И каким образом колебательные движения, дойдя до тела В, вновь превращаются в те кванты, которые поглощаются атомами или молекулами этого тела? Ясно, что обе теории не могут существовать одновременно» [184, с. 188].

Можно сравнить аргумент Эйнштейна в защиту существования локализованного светового кванта (相伴隨着的電磁波), который он приводит, пользуясь двумя пластинаами, с аргументом, выдвинутым им в 1927 г. на Сольвеевском конгрессе в за-

щить существования электрона (сопровождающего волну де Броиля). Они идентичны по форме. В 1927 г. Эйнштейн подверг острой критике утверждение о том, что волновая функция полностью описывает отдельный электрон. Из своих размышлений о корпускулярно-волновом дуализме волна-частица, в большей степени одиноких, он вынес принцип локального действия. Из этого принципа следовало, что должны существовать локализованные частицы, движущиеся в пространстве.

Важное замечание, которое можно рассматривать как предположение о существовании корпускулярно-волнового дуализма света, Эйнштейна сделал в заключение своего доклада: «Я хотел показать... что нельзя считать несовместимыми обе структуры (волновая и квантовая), которыми одновременно должно обладать излучение» [203, с. 194]. Эта точка зрения Эйнштейна в ретроспективе может рассматриваться как начальная попытка создания теории корпускулярно-волнового дуализма излучения. Эйнштейн пытается обозначить концепцию света, в которой частицы света были бы окружены полями так, чтобы вместе они определяли бы волновые эффекты. Но рассмотрение было проведено на качественном уровне. Эйнштейн пишет, что в новой волновой теории света всю энергию электромагнитного поля можно будет считать локализованной в особых точках: «я представляю себе каждую такую особую точку окруженной силовым полем, которое в основном имеет характер плоской волны с амплитудой, уменьшающейся с удалением от особой точки» [Там же]. И далее: «Я представляю себе квант как особую точку, окруженную сильным векторным полем» [Там же, с. 194].

В статье «Теория квантов света и проблема локализации электромагнитной энергии» (1910 г.) по поводу новой, еще не созданной теории света, Эйнштейн указывает на особую роль постоянной Планка, которая связала бы энергию излучения с энергией отдельного кванта. Он пишет: «...основания теории надлежит модифицировать так, чтобы в ней фигурировала постоянная  $\hbar$ . Такая перестройка оснований теории до сих пор еще не производилась. Точно так же среди теоретиков не существует единого мнения по поводу следующего вопроса: можно ли объяснить кванты света единым образом, исходя из свойств вещества, испускающего или поглощающего свет, или же электромагнитному излучению, помимо волновой структуры, надлежит приписать еще и такую структуру, в которой энергия излучения должна быть разделена на отдельные порции» [204, с. 238].

Дж. Күшинг в своем исследовании истории квантовой механики приходит к выводу о том, что «ни Эйнштейн, ни какой-либо другой физик того времени, не знал, как развить количественную теорию, которая одновременно представляла бы корпускулярные и волновые

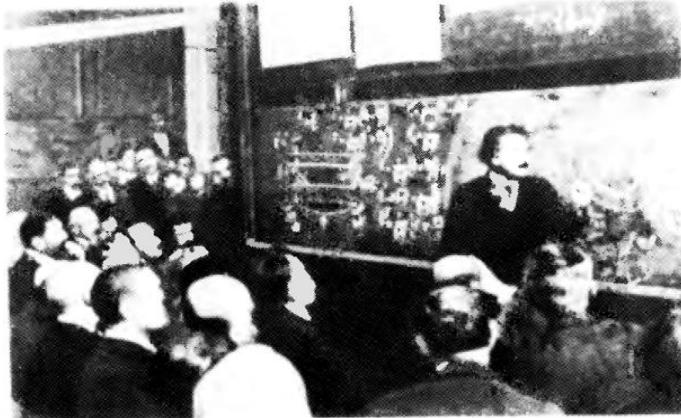
свойства. И сам Эйнштейн отмечал свою неспособность решения проблемы, которая бы объединяла бы эти оба аспекта» [258, с. 103].

Гипотеза световых квантов игнорировалась многими физиками даже после экспериментов Р. Милликена в 1916 г., подтвердивших уравнение фотоэффекта, полученное Эйнштейном с помощью этой гипотезы. Эксперименты Милликена проводились на протяжении многих лет, были выполнены очень тщательно. Он получил неопровергимые доказательства прямой пропорциональности между кинетической энергией фотоэлектронов и частотой падающего света. Милликен показал, что коэффициент пропорциональности не зависит от природы поверхности. В своей статье, сообщающей о полном экспериментальном подтверждении гипотезы квантов, он отметил «удивительную ситуацию, состоящую в том, что эти факты были правильно и точно предсказаны... с помощью той квантовой теории, которая ныне отвергается почти всеми» [309].

О том, что никто не развивал предложенную Эйнштейном идею квантов света вплоть до экспериментов А. Комптона и П. Дебая в 1922 г., показывает статья А. Пайса, который заключает: «Почти никто, кроме самого Эйнштейна, не имел дела с квантами света» [314, с. 386]. Хотя, согласно воспоминаниям Л. Бриллюэна, ситуация во Франции была иной, световые кванты признавали П. Ланжевен, Ж. Перрен, М. Кюри намного раньше, чем где-либо [306, с. 580]. Л. де Бройль обратился к квантам света в 1921 г. и в немногочисленный круг его единомышленников входил П. Ланжевен [156], ведущий французский физик - теоретик, которого де Бройль считал своим учителем. В Архиве Института Франции можно увидеть рукописные тетради с лекциями, которые слушал Л. де Бройль в Коллеж де Франс. Аккуратные записи курсов лекций П. Ланжевена сделаны рукой де Бройля в разные годы. Лекции по квантовой и атомной теории он прослушал с мая по июнь 1919 г., по теории относительности – с декабря 1921 г. по май 1922 г., по электронной теории - с декабря 1924 г. по январь 1925 г. [217].

В 1922 г. Эйнштейн был приглашен с докладом Ланжевеном от имени Коллеж де Франс. В обстановке огромного противостояния между двумя странами после окончания Первой мировой войны, многие в Берлине критиковали эту поездку Эйнштейна к безжалостному врачу. В свою очередь и в Париже многие считали неприемлемым приезд ученого вражеского государства. Эйнштейн не обиделся на то, что Французская академия отказалась его принять официально. Но он пользовался крепкой поддержкой ряда французских ученых, в том числе и Ланжевена. 31 марта 1922 г. Эйнштейн сделал доклад на французском языке в Коллеж де Франс, в первом ряду сидели Мария Кюри и Анри Бергсон [140, с. 119]. Л. де Бройль также присутствовал

на докладе А.Эйнштейна. В своей диссертации де Бройль пишет об этом событии, как очевидец: «Во время недавнего пребывания Эйнштейна в Париже Пенлеве выдвинул интересные возражения против теории относительности; Ланжевен легко сумел их отвести...» [23, с. 268]. В частной беседе Ж. Лошак с уверенностью говорил, что в силу своей застенчивости Л. де Бройль тогда не мог подойти и познакомиться с Эйнштейном, хотя ему было о чем с ним говорить.



*Фотография Эйнштейна, выступающего в Коллеж де Франс,  
31 марта 1922 г. [118]*

В архиве де Бройля сохранились рукописные переводы статей Эйнштейна 1905-1921 гг. с немецкого на французский язык, сделанные рукой де Бройля. Страстно увлеченный идеями Эйнштейна, де Бройль, делая эти переводы, стремился к полному пониманию каждой детали в работах Эйнштейна. Работы Эйнштейна о квантах света и о квантовой теории теплоемкости расширили область применения квантов энергии, введенных Планком ввел для объяснения закономерностей теплового излучения, на область молекулярно-кинетической теории и физической оптики. Ценность этих работ подчеркивал, в частности, Я.Г. Дорфман: «Работы Эйнштейна открыли новые перспективы в развитии квантовой теории» [56, с. 197].

## **2.5. Экспериментальные исследования 1921-1923 гг. и попытки создания квантовой теории излучения**

В период 1921-1923 гг. были выполнены работы Артура Комптона [252, 253] и Уильяма Дуана [266] по исследованию явлений дифракции X-лучей на кристаллах и их рассеянию на свободных электронах. Комптон, начавший изучение «экспериментальной стороны природы и общих характеристик вторичных гамма-лучей», в 1921 г. впервые обнаружил, что в процессе рассеяния лучей на электроне длина волны излучения возрастает примерно на 0.03Å по сравнению с длиной волны первичного излучения [53, с. 162]. Комптон констатировал, «что так должно быть, если бы каждый квант энергии рентгеновских лучей был сосредоточен в отдельной частице и действовал как

целое на отдельный электрон» [252]. В 1923 г. вышла статья Комптона «Квантовая теория рассеяния рентгеновских лучей на легких элементах», где он заявил, что «представленная теория основывается на предположении о том, что каждый электрон, принимающий участие в рассеянии, рассеивает целый квант... Согласие теории с экспериментом весьма убедительно указывает на то, что квант излучения несет с собой направленный импульс, равно, как и энергию» [253, с. 501]. Статья вызвала бурные дискуссии, при этом почти одновременно П. Дебай в Цюрихе объяснил подобный результат, используя понятие квантов света, аналогичные работы велись и в других лабораториях. Позже Комптон вспоминал: « я с радостью обнаружил, что меня поддерживают П.А. Росс из Стенфорда и М. де Бройль из Парижа, фотографические спектры которого демонстрировали результаты, сходные с моими» [255, с. 818].

В архиве Л. де Бройля, хранящемся в Институте Франции, можно прочитать любопытное письмо, написанное А. Комптоном к Л. де Бройлю 24 мая 1922 г. [217]. Письмо Комптона было отправлено сначала М. де Бройлю, который переправил его Л. де Бройлю, с просьбой дать ответ. Накануне опубликования своей обобщающей статьи [253] Комптон пишет, что прочитал статью Л. де Бройля «Х-лучи и термодинамическое равновесие» и обнаружил, что в ней получен закон поглощения Х-лучей веществом с помощью совершенно другого подхода. Де Бройль рассматривал аналогию между явлениями установления термодинамического равновесия в макроскопической системе и поглощения – испускания излучения атомом. Так же как при соприкосновении двух тел с разными температурами устанавливается термодинамическое равновесие, при прохождении высокочастотного рентгеновского излучения через вещество происходит процесс установления равновесия путем уменьшения частот излучения. Поглощенный веществом квант в последующем излучении проявляется в виде квантов меньшей частоты. Комптон собирался опубликовать свои результаты в докладах Национального исследовательского центра. Поэтому он заканчивает письмо к Л. де Бройлю словами: «Я взял на себя смелость кратко обсудить Вашу теорию поглощения в этом докладе» [217].

Комптона интересовали не только экспериментальные аспекты природы и характеристики вторичного излучения, вызванного Х-лучами, но и механизм, благодаря которому, более коротковолновое излучение порождает рассеянное излучение с большей длиной волны. Эксперимент и физическое объяснение эффекта были изложены Комптоном на заседании Американского физического общества в конце 1922 г. В его экспериментах было обнаружено, что спектры рассеянных лучей содержат линии, соответствующие линиям первичных

лучей, а также линии, смещенные в сторону более длинных волн. Применяя закон сохранения импульса и энергии, он связал изменение импульса кванта рентгеновского излучения с отдачей рассеивающего электрона. Эксперименты Комптона, таким образом, доказали существование квантов света [110].

После успешного истолкования эффекта Комптона с помощью световых квантов оставались не выясненными вопросы: как можно с помощью частиц – квантов света - описать явления интерференции и дифракции, оптическую дисперсию? Дуан (W.Duane, 1872-1935 гг.) интерпретировал свои эксперименты по дифракции на бесконечно длинной отражающей решетке с позиций квантов света [266, 267]. Он рассматривал дифракцию рентгеновского излучения на решетке или кристалле, основываясь на квантовых идеях, без ссылок на явление интерференции. Так же, как и Комптон, он представил картину дифракции как упругое столкновение светового кванта с решеткой. Дуан предположил, что передача импульса решетке происходит целыми величинами, кратными  $h/a$ ,  $a$  - постоянная решетки. Поскольку масса решетки велика, то пренебрегая потерями энергии кванта света  $h\nu$ , можно считать, что, падая под углом  $\theta$ , квант будет отражаться под углом  $\theta'$  без изменения частоты. Тогда из закона сохранения импульса получается формула:  $(h\nu/c)(\sin\theta - \sin\theta') = nh/a$ , совпадающая с известной формулой дифракции Брэгга  $a(\sin\theta - \sin\theta') = n\lambda$ . Работы Дуана лежат в основе концепции Альфреда Ланде (A. Lande), отрицающей существование дуализма. Согласно этой концепции свет имеет волновую природу, а проявление свойств частиц, интерпретируемые как волновые, объясняется квантованием их импульсов [288-290]. Диалог между М. Борном и В. Бимом, отстаивающими корпускулярно-волновой дуализм, и А. Ланде, отрицающего дуализм, опубликован в [225, 286]. Ланде предлагал рассматривать материю исключительно с позиций корпускулярной теории, а свет только с помощью волновой теории.

Вопросу трактовки типичного волнового явления – эффекта Доплера, с корпускулярной точки зрения была посвящена работа Э. Шредингера «Эффект Доплера и правило частот Бора» [323], в которой он дал строгий вывод формулы Доплера, рассматривая испускание кванта света  $h\nu$  по направлению движения атома с массой  $m$ . Используя закон сохранения импульса и энергии, он получил сдвиг частоты, обусловленный разностью в скоростях атома (до испускания  $v_1$  и после испускания  $v_2$ ), совпадающий с формулой Доплера.

Таким образом, в период с 1921-1924 гг. было убедительно показано, что квантово-корпускулярную гипотезу, которая впервые была использована для объяснения рассеяния рентгеновских лучей, можно

использовать и для объяснения типичных волновых явлений, связанных со светом. Однако оставался целый ряд явлений волновой оптики, которые не поддавались описанию на языке квантов света (дифракция Френеля, дисперсия) и это вызывало затруднения в выборе между противоположными теориями о природе излучения. В связи с этим вставал вопрос: Как совместить корпускулярные и волновые представления о свете? Эйнштейн высказывал идею объединения разных аспектов излучения света – частицу и волну – в фундаментально новой теории, но путь создания такой теории оставался неясен. Дж.Дж. Томсон представлял себе утверждение дуализма в физике как борьбу «между тигром и акулой, каждый из них является величайшим в своей стихии, но беззащитным в чужой среде» [330, с. 306]. О двух, совершенно различных теориях, существовавших к началу 1923 г., классической волновой и квантовой, каждая из которых описывала только свой класс явлений, противоречиях между ними, и внутри каждой, писал в своем обзоре С.И. Вавилов [35]. Он отмечал достоинства и недостатки двух различных точек зрения: «Если в классической теории ясны сами принципы, а затруднения возникают в применениях, то в теории квантов, наоборот, принципы в их современной формулировке необычайно загадочны, применение их поразительно просто и результаты не менее поразительно совпадают с опытом» [Там же, с. 40]. По поводу принципа соответствия Бора, который устанавливает соответствие между принципами классической теории и следствиями теории квантов, Вавилов отмечает, что оно является только формальным констатированием опытного факта - устанавливается равенство между величинами, теоретически не связанными. Требовалась теория, дающая единый, сплитный образ, а не раздвоенный, каким его делали две точки зрения на природу света.

Попыткой создания такой теории явилась статья Н. Бора, Х. Крамерса, Дж. Слетера «Квантовая теория излучения» [220], опубликованная в 1924 г. В ней утверждалось, что законы сохранения энергии и количества движения не выполняются строго в процессах взаимодействия вещества с излучением. Написана статья была после открытия Комптона, но, тем не менее, в ней отвергалось существование фотонов. Теория Бора, Крамерса, Слетера не выдержала экспериментальной проверки [53, 167]. Несмотря на то, что теория была быстро опровергнута, она сыграла значительную роль для дальнейшего развития квантовой механики. Статья начиналась с констатации дуализма прерывного и непрерывного в процессах взаимодействия излучения и вещества. «Волновой характер распространения света, с одной стороны, и его поглощения и испускание квантами, с другой стороны, являются теми экспериментальными фактами, которые следует положить в основу любой атомной теории и для которых следует ис-

кать каких-либо объяснений» - писали авторы. [220, с. 785]. Интерпретируя спонтанное испускание, введенное Эйнштейном как процесс, «индуцированный виртуальным полем излучения», а индуцированные переходы как происходящие «благодаря виртуальному излучению в окружающем пространстве, обусловленному другими атомами», в этой теории была проложена дорога для концепции вероятности как категории физической реальности. Гейзенберг указывал, что корни статистической интерпретации волновой функции берут свое начало в статье Бора-Крамерса-Слэттера [53, с. 187].

Джеммер пишет, что «поиски приемлемой механической теории, с помощью которой можно было бы объяснить «механизм» квантов света, объяснить существование тесной связи между корпускулярным понятием энергии  $E$  и волновым понятием частоты  $v$ , связи, которая никогда в классической физике не встречалась и все же была установлена ... были предметом многочисленных дискуссий в то время» [53, с. 49]. Поиски такой теории продолжались многими учеными, среди них были Л. Бриллюэн, М. Вольфке, В. Боте [306]. А. Зоммерфельд в 1924 г. в своей статье, обращаясь к «великому вопросу современности – вопросу о природе света», анализировал существующие теоретические представления. Он назвал представления Эйнштейна «радикальной квантовой теорией света», а точку зрения Бора, Крамерса и Слэттера назвал «компромиссной». Зоммерфельд показал, что «теория, совмещающая волновые и корпускулярные свойства света, еще не создана» [62, с. 14].

В общем потоке работ, предлагающих квантовую теорию излучения, находились и статьи де Бройля, опубликованные в середине 1923 г. [24, 26, 28]. Период одиночества де Бройля, и в некотором смысле изоляция от работ, ведущихся в то время под руководством Бора, Борна, Зоммерфельда, сделали мысль де Бройля оригинальной, сосредоточенной на понимании физической реальности, обращенной к установлению закона природы, который представлял большую загадку для физиков. Именно два человека – Эйнштейн и де Бройль сыграли решающую роль в открытии фундаментальной двойственности, связанной с природой излучения и материи. Эйнштейн отстаивал и развивал корпускулярную модель света, и неявно в его работах намечалась концепция дуализма света. Но свое подтверждение эта концепция получила позднее, в 1923 г. вместе с концепцией дуализма всей материи. Эйнштейн выступил как предтеча идей Л. де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи. Во взглядах Эйнштейна и де Бройля было много общего, главное, что дуализм они всегда рассматривали как проявление физической реальности и пытались найти ему физическое объяснение.

## 2.6. О влиянии А. Эйнштейна и А. Пуанкаре на Л. де Бройля

Влияние работ Эйнштейна, посвященных квантам света, на де Бройля было огромно. В.Л. Гинзбург, в докладе, посвященном столетию квантовой теории, сказал, что «Эйнштейн первым поддержал де Бройля и, в известной мере, был его предтечей» [45, с. 6]. А. Пайс, в своем исследовании [312] также уделяет определенное внимание вопросам влияния Эйнштейна на де Л. Бройля и Э.Шредингера, в результате которого была создана волновая механика Шредингера – де Бройля. Период, который начался в сентябре 1923 г. с кратких статей де Бройля в Докладах Французской академии наук, а завершился в январе 1926 г. статьей Шредингера [191], может быть назван периодом рождения волновой механики. Но, это влияние и связь не являлась односторонней, ее начало следует искать в более раннем влиянии Эйнштейна на де Бройля, начиная с 1911 г., со времени Первого Сольвеевского конгресса. Тогда де Бройль, только что завершивший свое гуманитарное образование, впервые прочитал о проблеме излучения и о квантах света. Эйнштейн сыграл ключевую роль, оказав влияние на выбор темы теоретического поиска де Бройля. Успех де Бройля основывался на использовании квантов света и специальной теории относительности Эйнштейна. Де Бройль, в свою очередь, обосновав идею волн материи, о которой Эйнштейн впервые узнал из диссертации де Бройля, оказал влияние на Эйнштейна, завершившего разработку статистики Бозе. И, наконец, оба – Эйнштейн и де Бройль, оказали влияние на работу Шредингера по созданию волновой механики.

В ежегодном докладе, который де Бройль делал как непременный секретарь Французской Академии наук, в декабре 1955 г., он рассмотрел дуализм волн и частиц в работах Эйнштейна и признался, что они послужили отправной точкой его собственных дальнейших рассуждений [241]. Выполненный Эйнштейном анализ теплового излучения показал, что фотоны с энергией  $E=h\nu$  должны обладать импульсом, а атом, который излучает фотон, испытывать отдачу. «Этот анализ и другие аналогии, над которыми несколько лет спустя, я много размышлял, показывают тесную и глубокую связь между двумя великими открытиями: теории относительности и квантов света. Без идей теории относительности и, в частности, без релятивистского закона сложения скоростей и формул соответствующей динамики, было бы невозможно понять свойства квантов света. Фотон смог найти свое место лишь в релятивистской физике» [241, с. 11].

У де Бройля, так же как у Ланжевена и Перрена, чьи лекции он слушал и с кем общался, не было сомнений по поводу существования квантов света. Эксперименты М. де Бройля к 1921 г. убедительно показывали, что при своем распространении X-лучи отдают полностью

квант энергии отдельному электрону, и Л. де Бройль пытался найти этому объяснение. Так же как и брат, Л. де Бройль был убежден в существовании синтетической теории, сочетающей представления волн и частиц. Луи де Бройль изучил все публикации Эйнштейна о природе света. Эйнштейн обсуждал математические аспекты дуалистического представления, но в его работах не было никакой физической интерпретации, в которой противоположные свойства частиц и волн были бы объединены.

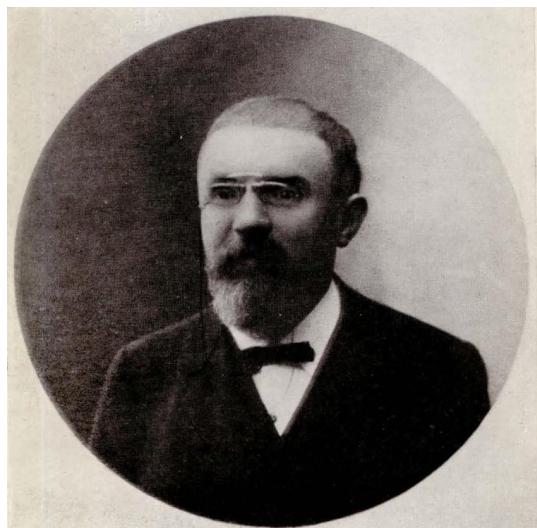
В конце 1921 г. Л. де Бройль представил яркую статью «О корпускулярном спектре элементов», в которой синтез волн и частиц предлагалось построить с помощью аналогии с гидродинамикой, в которой законы, напоминающие уравнение волны, управляют движением огромного числа молекул воды. В начале 1922 г. де Бройль написал статью «Излучение абсолютно черного тела и кванты света» [29, с. 184-189], в которой вывел закон Вина без использования электромагнитной теории. Это первая статья, в которой он идет по пути дуализма света и использует корпускулярное представление Эйнштейна. Прежде чем перейти к решению поставленной задачи де Бройль заявляет: «принятой гипотезой является гипотеза квантов света» [29, с. 184]. Ссылаясь на явление фотоэффекта, он пишет: «Наши знания о фотоэлектрическом эффекте доказывают увеличивающуюся с каждым днем очевидность того, что поглощение как и испускание, излучения частоты  $\nu$  происходит дискретным образом – квантами с энергией, равной  $h\nu$ » [Там же, с. 181].

Де Бройль рассматривает фотоны как частицы или «атомы света» с массой  $h\nu/c^2$  и импульсом  $h\nu/c$ . Исходя из представления о равновесном излучении как о газе, состоящим из световых атомов, с энергией  $E = h\nu$ , де Бройль приходит к формуле закона Вина. Представив молекулы, которые состоят из 1, 2, 3, .. атомов света, он получил так же как Эйнштейн в 1906 г. закон Планка [238], для распределения энергии в спектре излучения абсолютно черного тела. В 1963 г. в интервью де Бройль признался, что эта статья была отправной точкой его дальнейшей работы: «У меня появилась идея, но она еще не родилась. Я еще не осмеливался о ней говорить, но она уже поселилась в моей голове» [305, с. 38].

Ф. Кубли в своей диссертации «Луи де Бройль и открытие волн материи» [284] обратил внимание на то, что многие ученые, работающие как в границах классической физики, так и старой квантовой теории, внесли свой вклад в формирование идеи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме, но влияние двух физиков – А. Пуанкаре и А. Эйнштейна в этом ряду явились особенным. Если о влиянии Эйнштейна на протяжении длительного времени можно говорить, изучая работы де Бройля, читая переписку в 1952-1953 гг. Эйнштейна и де

Бройля, речи, которые произносил де Бройль во Французской академии, то влияние Пуанкаре было очень сильным в период становления Л. де Бройля как физика. О влиянии Пуанкаре, который умер в 1912 г. и не принимал участия в утверждении квантовой теории света, можно судить опосредованно через его лекции, книги, статьи, которые изучал де Бройль, получая образование по теоретической физике.

Де Бройль слушал лекции А. Пуанкаре в Коллеже Франс в 1912 г., восторгался его математическим гением: «В 1912 г., когда мне было всего лишь 19 лет, я с восторгом следил за развитием новой физики и без устали зачитывался томами курса математической физики Анри Пуанкаре и его работами по философии науки» [32, с. 711]. О том влиянии, которое Анри Пуанкаре оказал на молодое поколение и лично на него, де Бройль писал: «В дни своей юности я особенно усердно изучал именно эту науку. Все молодые люди моего поколения, интересовавшиеся математической физикой, воспитывались на книгах Пуанкаре. В ту пору преподавание математической физики в Сорбонне несколько отставало от требований времени. Поль Ланжевен так никогда и не опубликовал прекрасные курсы лекций, прочитанные им в Коллеж де Франс. Новые физические теории, к тому же блестяще изложенные, мы смогли найти лишь в книгах Пуанкаре. Даже через много лет, став уже вполне зрелыми людьми, мы все еще ощущали на себе благотворное влияние этих книг» [32, с. 703].



Анри Пуанкаре, 1911г. [228]

Де Бройль подчеркивал важную роль отдельных разделов математической физики, которые были блестяще изложены в книгах Пуанкаре. Ремарка де Бройля по поводу термодинамики была сделана, прежде всего, с точки зрения преподавателя, которым являлся сам де Бройль: «Изложение термодинамики, данное Пуанкаре, и поныне считается образцовым и представляет интерес для тех, кто преподает термодинамику» [Там же, с. 704]. Пуанкаре указывал в своей работе

на то, что наличие статистического равновесия в системе излучения и вещества требует дальнейшего объяснения. Возможно, эти слова послужили источником дальнейших рассуждений де Бройля. Идея симметрии между светом и веществом навела на мысль де Бройля представить фотон такой же частицей, имеющей массу покоя как и частицы вещества.

О пророческих словах Пуанкаре в 1905 г., произнесенных за десять лет до появления теории Бора, де Бройль пишет в книге «Новая физика и кванты» [30]. В ней де Бройль цитирует фразу Пуанкаре, написанную в связи с проблемами объяснения линейчатости спектров излучения атомов, которые на первый взгляд приводят к мысли о гармониках, но эта задача не имеет никакой аналогии с другими задачами математической физики, такими, как колебания Герца в резонаторе, или задачей Фурье об охлаждении твердого тела. Пуанкаре пишет о спектрах излучения: «Эти законы проще, но они имеют совершенно другую природу. В этом не отдавали себе отчета, и я думаю, что здесь и кроется один из важнейших секретов природы» [131, с. 116]. Можно отметить своеобразную перекличку в этом предвидении Пуанкаре и интуитивного убеждения де Бройля, когда он в своей диссертации пишет: «Согласно какому-то великому закону природы, каждая порция энергии связана с частотой периодического процесса ...» [29, с. 260]. Де Бройль обращает внимание на то, что великий секрет, о котором говорил Пуанкаре, связан с существованием квантов, с помощью которых теория Бора смогла описать спектральные законы.

Через несколько недель после Первого Сольвеевского конгресса Пуанкаре опубликовал статью «О теории квантов», в которой утверждал, что «гипотеза квантов – единственная гипотеза, приводящая к закону излучения Планка» [135]. Джеммер, рассматривая эту последнюю работу Пуанкаре, приводит его слова: «Хорошо известно, к какой гипотезе пришел Планк, исследуя законы излучения: энергия излучателей света меняется скачкообразно. Именно эта гипотеза называется теорией квантов. Едва ли нужно подчеркивать, насколько эти идеи отличаются от традиционных концепций: физические явления, по-видимому, перестают подчиняться законам, которые можно выразить с помощью дифференциальных уравнений, и это, вероятно, самое большое и самое глубокое потрясение в философии естествознания со времени Ньютона» [53, с. 171]. Об этой работе Пуанкаре де Бройль упоминает и в историческом обзоре в своей диссертации, как о работе, показывающей необходимость принятия идей Планка. Пуанкаре являлся безусловным авторитетом для де Бройля.

В 1954 г., в связи со столетием со дня рождения А.Пуанкаре, де Бройль произнес речь в Французской академии наук, в которой с глубоким уважением отмечал роль Пуанкаре в создании теории относи-

тельности. Он писал: «еще немного и Анри Пуанкаре, а не Альберт Эйнштейн первым построил бы теорию относительности во всей ее общности, доставив французской науке честь этого открытия... однако Пуанкаре так и не сделал решающего шага и предоставил Эйнштейну честь разглядеть все следствия из принципа относительности и, в частности, путем глубокого анализа измерений длины и времени выяснить подлинную физическую природу связи, устанавливаемой принципом относительности между пространством и временем» [131, с. 706]. Де Бройль задается вопросом, почему Пуанкаре не смог в своих выводах дойти до конца и пытается найти ответ. Возможно, «чрезмерно критическая направленность склада мышления» вместе с скептическим отношениям к физическим теориям, считая, что «существует бесконечно много логически эквивалентных точек зрения и картин действительности, из которых ученый, руководствуясь исключительно соображениями удобства, выбирает какую-то одну» [Там же, с. 707]. В этом видится отличие Пуанкаре-математика от де Бройля, для которого физические образы играли первую роль. Объяснение и признание де Бройля использовал при рассмотрении вопроса о роли Пуанкаре в создании теории относительности В.Л. Гинзбург [46].

Слова Пуанкаре о свободе науки: «Свобода для науки – как воздух для животного... Мысль не должна подчиняться ни догме, ни партии, ни увлечению, ни интересу, ни предвзятой идее, ни чему бы то ни было, исключая только сами факты, потому что для нее подчиниться означает прекратить существование» (цитируется по [104, с. 101]), де Бройль прочитал в молодости и пронес через всю жизнь. Для него наука была смыслом жизни, он много размышлял о свободе научного творчества. Когда де Бройль вернулся в 1952 г. к своей незавершенной теории двойного решения, им была опубликована книга «Соотношения неопределенностей Гейзенberга и вероятностная интерпретация механики». Де Бройль написал в предисловии: «...необходимо охранять свободу научного творчества и свободную инициативу оригинальных исследований, поскольку эти факторы всегда были и останутся самыми плодотворными источниками великого прогресса науки» [30, с. 197].

Пуанкаре был близок де Бройлю по многим вопросам, связанным с философией науки. Интересовавшие де Бройля вопросы, связанные с вероятностью и детерминизмом, он нашел в книгах Пуанкаре. Де Бройль писал: «Проблемой, имеющей большое значение как для теоретической физики, так и для всей натуральной философии, является проблема детерминизма и тесно связанная с ней проблема корректного определения случайного, вводящего в детерминизм вероятность. Пуанкаре неоднократно обращался к этим проблемам. В настоящее время, когда они стали предметом рассмотрения, весьма интересно прочитать посвященные им работы Пуанкаре» [131, с. 707].

Вернемся к вопросу о взаимном влиянии де Бройля и Эйнштейна, которое существовало в разные периоды их жизни, но конечно, имело разную степень значимости для каждого из них. Говоря об отношениях де Бройля и Эйнштейна нельзя сказать, что они были приятельские или дружеские. Со стороны де Бройля, это было отношение глубокого уважения. Де Бройль и Эйнштейна разделяла разница в возрасте - 13 лет, в то время, когда сам Эйнштейн и его работы были известны во всем мире, де Бройль только начинал свой путь в науке. О том, как де Бройль на протяжении всей жизни относился к Эйнштейну, пишет Ж. Лошак: «Луи де Бройль всю свою жизнь питал глубокое уважение к Эйнштейну, который был его могущественным покровителем в молодости и постоянной поддержкой в одинокие годы зрелого возраста» [104, с. 48]. Эйнштейн поддержал диссертацию де Бройля, сославшись на нее в своих работах по квантовой теории идеального газа, в переписке со Шредингером обращал его внимание на идею де Бройля о волнах материи. Переписка де Бройля и Эйнштейна, которая состоялась в 1952-1954 гг., опубликована Б.Г. Кузнецовым [87, с. 58-59] и позволяет судить об отношениях этих двух ученых, разделяющих общие взгляды на «возможность полного объективного представления о физической реальности» [Там же, с. 58]. Эйнштейн обратился к де Бройлю в 1952 г. в связи с возобновлением де Бройлем работы над теорией двойного решения, и это было его одобрением. В своем ответе Эйнштейну де Бройль пишет: «Мне было чрезвычайно интересно читать Ваше письмо и размышлять над ним. Оно поддержало меня в решении продолжить в более углубленной форме рассмотрение идей, которые я смутно предвидел еще в 1927 г.» [Там же, с. 59].

В 1952 г. Эйнштейн написал статью для сборника в честь 60-летия Л. де Бройля, которая называется «Предварительные замечания о фундаментальных понятиях». Статья Эйнштейна помещена в самом начале, за ней следуют статьи таких известных физиков, философов, коллег по лаборатории М. де Бройля и по Французской академии наук, как В. Паули, Э. Шредингера, М.А. Тоннела, М. де Бройля, Ш. Могена, Д.П. Томсона, А. Довилье, Ж.П. Вижье [291]. Эйнштейн в какой-то степени объяснял, почему он не поддержал поиски детерминистического описания волны де Бройля в 1927 г.: «Я хочу сказать несколько слов... Это - слова оправдания. Они должны показать, почему, в годы относительной молодости, наблюдая с восхищением, гениальное открытие Луи де Бройля о внутренней связи между дискретными квантовыми состояниями и состояниями резонанса, я, однако, безостановочно продолжал искать средство, чтобы решить загадку квантов по-другому, или, по крайней мере, помогал готовить решение. Эти исследования были основаны на глубоком

чувство неудовлетворения принципиального характера, которое у меня вызывали базовые основы статистической квантовой теории. По этому поводу, я очень хорошо знаю, что это чувство абсолютно не было чуждо и самому Луи де Бройлю. Это ясно проявляется в попытках, которые он проводил с 1920 г., чтобы дополнить волновую теорию квантов и в концептуальных рамках классической механики (материальные точки, потенциальная энергия) дать полное описание конфигурации системы как функции времени, - идея, на которую совсем недавно и не зная о работе де Бройля снова обратил внимание г. Давид Бом (теория волны-пилота)» (курсив Эйнштейна - А.С.) [291, с. 3]. Эта поддержка Эйнштейна придавала силы де Бройлю в поиске детерминистического объяснения корпускулярно-волнового дуализма, к которому он приступил в 1952 г., возобновив работу над теорией волны-пилота [1, 20, 21].

Следует подчеркнуть, что Эйнштейн сыграл важную роль в присуждении де Бройлю Нобелевской премии. Де Бройля, начиная с 1925 г., неоднократно номинировали на премию, в том числе это выдвижение делал и русский профессор О. Хвольсон, но присуждение премии произошло только после обращения Эйнштейна. Известно, что в сентябре 1928 г. Эйнштейн написал письмо в Нобелевский комитет, в котором сфокусировал свое внимание на открытии квантовой механики. «По-моему, наиболее важное и не вознагражденное достижение в физике – это понимание волновой природы механических процессов» - писал он (цит. по [306, с. 515]). Эйнштейн далее выдвигает несколько предложений комитету. Во-первых, считал он, половина награды должна быть отдана де Бройлю, другая половина должна быть разделена между Дэвиссоном (C.J. Davisson) и Джермером (L.H. Germer). Он находит, что это трудный случай, поскольку де Бройль является главным инициатором, но он не предполагал возможность экспериментального подтверждения существования волн материи. В этом Эйнштейн не совсем прав, поскольку об экспериментальной возможности дифракции электронов де Бройль писал в своей диссертации в 1924 г. Далее Эйнштейн продолжал: «На равных должны рассматриваться теоретики Гейзенберг и Шредингер (одна общая Нобелевская премия). Уважая их достижения, каждый из этих исследователей заслуживает целиком Нобелевской премии, несмотря на то, что их теории в основном совпадают. Тем не менее, по моему мнению, де Бройль должен иметь приоритет, исключительно потому, что его идея, безусловно, правильна, хотя она все еще вызывает вопросы, многие из которых существуют в теориях двух последних названных исследователей» [Там же]. В 1929 г. премия по физике была присуждена Л. де Бройлю за «открытие волновой природы электрона», а Д. Дэвиссон и Д.П. Томсон получили Нобелевскую премию в 1937 г. за «их экспериментальное открытие дифракции электронов на кристаллах».

В последний год своей жизни Эйнштейн написал предисловие к книге де Брайля «Физика и микрофизика», в котором дал высокую оценку научной деятельности Л. де Брайля. Он отмечал, что де Брайль был первым, кто «осознал тесную физическую и формальную взаимосвязь между квантовыми состояниями материи и явлениями резонанса» и добавил, что наибольшее впечатление на него произвела «искренность изложения борьбы за логическое обоснование основ физики. В конечном счете, именно эта борьба привела де Брайля к твердому утверждению в том, что все элементарные процессы имеют статистическую природу» [211, с. 349].

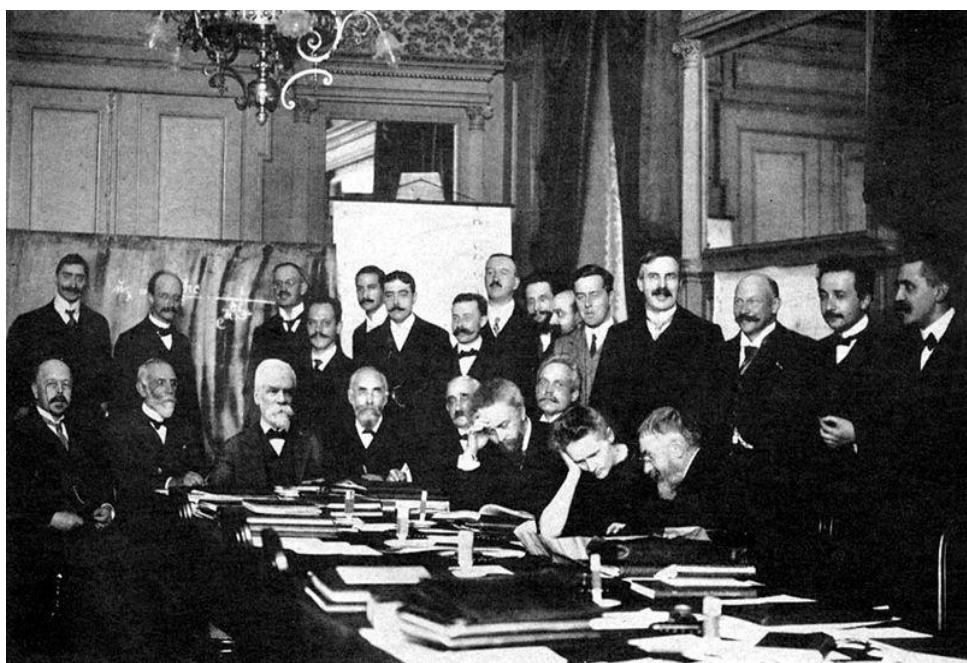
## **2.7. Проблемы излучения, обсуждавшиеся на Первом Сольвеевском конгрессе 1911 г.**

Сольвеевские конгрессы по физике занимают особое место в истории современной физики. Физика все более дифференцируется, и растет число соответствующих физических конференций, но в этом ряду ранние Сольвеевские конгрессы (с 1911 г по 1933 г.) стали выдающимся событием [9, 53, 105, 107]. Их проведение совпало с «золотым веком» теоретической физики, о которых в середине 30-х годов XX века И.Е. Тамм сказал: «Я думаю, если бы Пушкин жил в наши дни, он был бы физиком» [42, с. 213]. Конгрессы были организованы по частной инициативе Эрнестом Сольвеем, о котором Г.А. Лоренц писал: «Э. Сольвей образовал одну из процветающих индустрий (по производству соды – А.С.) в мире ... Свою удачу Сольвей использовал в благотворительных целях. Убежденный, что лучшее понимание законов природы и человеческого общества будет служить залогом продвижения по пути всемирного счастья, он предпринял по многим направлениям организацию и поддержку научных исследований и обучения» [219, с. 5]. Начиная с 1892 г., на землях, принадлежащих городу Брюсселю, Э. Сольвей вместе с братом, А. Сольвеем, построили и оборудовали Институт Физиологии, Институт Гигиены, Школу политических и социальных наук, Школу предпринимательства. Но вершиной всей этой деятельности было образование в 1912-1913 гг. Института Физики и Химии.

Идея, воплощением которой стал Первый Сольвеевский конгресс по физике, пришла к В. Нернstu и М. Планку около 1910 г. Они полагали, что возникшие проблемы в теории квантов и теплового излучения становятся настолько серьезными, что международные встречи известных физиков и их совместная работа должны помочь в разрешении этой кризисной ситуации. Планк писал: «...все, что может случиться в этом направлении, возвуждает у меня великий интерес, и я обещаю мое участие в любом таком событии. Я могу сказать без преувеличения, что за последние 10 лет ничего в физике не было

столь стимулирующего, возбуждающего и раздражающего меня, чем это действие квантов» [219, с. 4].

Первый Сольвеевский конгресс проходил в Брюсселе с 30 октября по 3 ноября 1911 г. под названием «Теория излучения и кванты» [296]. Организаторы конгресса в лице В. Нернста, М. Планка и Г.А. Лоренца (он был председателем конгресса) предполагали обсудить кризис в физике, связанный с квантовой теорией. Для обсуждения выносились следующие вопросы: теория теплового равновесного излучения, взаимодействие излучения и вещества, применение квантовой теории к атомным системам. Развернулась острая дискуссия по проблемам квантов и излучения. Начиная с 1905 г., Эйнштейн доказывал, что наблюдаемое распределение энергии в излучении черного тела, вынуждает пересмотреть представление о природе излучения как непрерывного процесса в пространстве и времени. Однако принять выводы, к которым пришел Эйнштейн, организаторы, прежде всего Планк, не были готовы.



*Фото участников Первого Сольвеевского конгресса, 1911 г.*

*Сидят (слева направо): Вальтер Нернст, Марсель Бриллюэн, Эрнест Сольве, Хендрик Лоренц, Эмиль Варбург, Вильгельм Вин, Жан Батист Перрен, Мария Кюри, Анри Пуанкаре. Стоят (слева направо): Роберт Голдсмит, Макс Планк, Генрих Рубенс, Арнольд Зоммерфельд, Фредерик Линдманн, Морис де Бройль, Мартин Кнудсен, Фридрих Газенорль, Георг Хостлем, Эдуард Герцен, Джеймс Джинс, Эрнест Резерфорд, Хейке Камерлинг-Оннес, Альберт Эйнштейн, Поль Ланжевен*

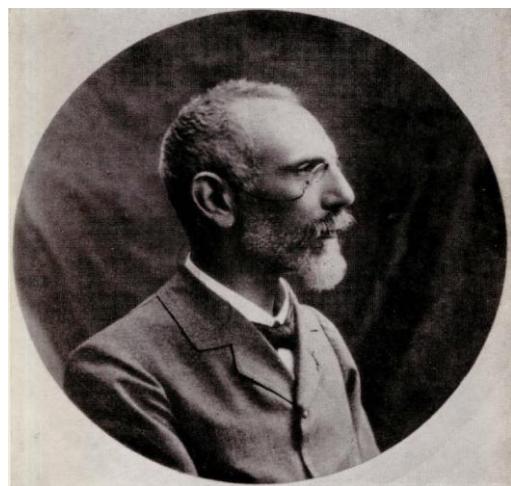
В повестке конгресса не фигурировали идеи Эйнштейна о структуре излучения. На конгрессе было представлено всего 12 докладов, это были известные физики, люди зрелого возраста и почти все они относились сдержанно к новым теориям. Был запланирован доклад

Лоренца о применимости теоремы о равномерном распределении энергии к излучению и о ее «катастрофическом» следствии. Д. Джинса попросили рассмотреть классическую теорию удельной теплоемкости, а Эйнштейна - доложить о квантовой теории удельной теплоемкости. М. Планк сделал один из основных докладов «Закон излучения черного тела и гипотезы об элементарном кванте действия». Планк изложил аргументы, которые привели его к открытию кванта действия. В докладе, в частности, рассматривалось противоречие между выдвинутой Эйнштейном гипотезой квантов света и теорией электромагнитного поля Максвелла, т.е. между описаниями непрерывной и дискретной природы света.

Обсуждение докладов было жарким и часто весьма острым, оно нашло отражение в многочисленных работах [53, 68, 105, 157]. В книге, написанной М. де Бройлем в 1951 г., который являлся секретарем Первого Сольвеевского конгресса, приводятся многочисленные документы и комментарии, касающиеся участников этого конгресса [228].



Морис де Бройль, 1911 г. [228]



Марсель Бриллюэн, 1911 г. [228]

Конгресс собрался в основном благодаря инициативе Нернста, который был в дружеских отношениях с бельгийским промышленником Э. Сольвеем. Работа Эйнштейна по удельным теплоемкостям также послужила косвенной причиной созыва конгресса. Нернст, занимаясь точными измерениями удельных теплоемкостей при низких температурах, обнаружил согласие собственных экспериментов с формулой Эйнштейна, которая объясняла уменьшение удельной теплоемкости с убыванием температуры. Нернст выступил со словами поддержки: «фундаментальные и плодотворные идеи Планка и Эйнштейна должны послужить основой для наших дискуссий; эти представления можно изменить и уточнить, но нельзя игнорировать» [228, с. 11].

А. Пайс [118] обращает внимание на то, что для конгресса Эйнштейн готовил доклад «К современному состоянию теории удельной

теплоемкости», но к этому времени общая теория относительности уже стала его главной концепцией и оставалась такой вплоть до 1915 г. Может быть, в этом кроется его спокойная позиция по отношению к собственной гипотезе световых квантов, и он не делает следующего шага по объединению корпускулярной и волновой точек зрения на природу света.

На конгрессе обсуждалась попытка Д. Джинса объяснить все выявленные недостатки классической теории, не прибегая к идеям о квантах и выводам Эйнштейна о неизбежности квантовой структуры излучения. Пуанкаре отвел попытку Джинса замечанием: «не в этом роль физических теорий. Они не должны вводить больше произвольных постоянных, чем имеется явлений, подлежащих объяснению» [213, с. 160]. В докладе У. Брэгга было выдвинуто предположение, что рентгеновские и гамма-лучи корпускулярны по природе, они распространяются в пространстве без изменения формы и энергии, так же как и свободная частица. Брэгг утверждал: «Энергетические соображения непосредственно привели нас к предположению, что рентгеновские и  $\gamma$ -лучи корпускулярны по природе, поскольку каждый луч является отдельной сущностью, движущийся через пространство без изменения в форме и содержании энергии, совершенно как двигалась бы свободная частица» [53, с. 234].

Против гипотезы Эйнштейна на конгрессе выступил Планк: «Когда думаешь о полном опытном подтверждении, которое получила электродинамика Максвелла при исследовании даже самых сложных явлений интерференции, когда думаешь о необычайных трудностях, с которыми придется столкнуться всем теориям при объяснении электрических и магнитных явлений, если они откажутся от этой электродинамики, инстинктивно испытываешь неприязнь ко всякой попытке поколебать ее фундамент. По этой причине мы и далее оставим в стороне гипотезу «световых квантов», тем более, что эта гипотеза находится еще в зародышевом состоянии. Будем считать, что все явления, происходящие в пустоте, в точности соответствуют уравнениям Максвелла и не имеют никакого отношения к постоянной  $h$ » [53, с. 282].

О значении Сольвеевских конгрессов в истории физики О.А. Старосельская-Никитина написала: «это был ареопаг, но без элемента внешней принудительности решений античного учреждения. Зато моральная принудительность тех или иных оценок, несомненно, давала себя чувствовать с большой силой и влияла на дальнейшее развитие той или иной проблемы» [157, с. 62]. То, чего Первый Сольвеевский конгресс в реальности достиг – это было обострение разногласий. На заключительном заседании Марсель Бриллюэн высказал свою точку зрения: «Кажется несомненным, что новые факты застав-

ляют нас вводить в наши физические и химические представления дискретность, что-то, что меняется скачками, о чем мы не имели ни малейшего понятия несколько лет тому назад» [213, с. 178]. На вопрос как вводить понятие прерывности в физические теории, Бриллюэн ответил: «Это я и сам еще не вижу» [157, с. 19]. Косвенные результаты этого конгресса не поддаются учету. Бессмысленно отвечать на вопрос: Какое значение, например, имело то, что Бор, посетив Резерфорда через несколько недель после его возвращения из Брюсселя, услышал из его уст восторженный отчет о происшедшем? Или что де Брайль прочел труды конгресса в рукописи, подготовленной к печати М. де Брайлем и П. Ланжевеном, и слушал их непосредственные впечатления?

Свое мнение о Первом Сольвеевском конгрессе Эйнштейн изложил в письме к Бессо, написанном через месяц после окончания конгресса: « В Брюсселе все со стенаниями констатировали несовершенство теории, хотя выхода из положения так и не нашли. Конгресс этот вообще напоминал плач на развалинах Иерусалима. Ничего положительного не возникло. Мои рассуждения о колебаниях были встречены с большим интересом и без серьезных возражений. Пролеглось я мало, так и не услышав ничего из того, что мне было бы неизвестно» [213, с. 31]. Еще долгий период после Сольвеевского конгресса не существовало окончательной точки зрения на проблему дуализма волна – частица. Был достигнут лишь определенный компромисс: с одной стороны, флуктуации признавались как аномалии, а с другой стороны, существовала волновая теория, которая объясняла интерференционные явления.

Если для Эйнштейна конгресс дал мало нового для его дальнейшей работы над теорией световых квантов, то для юного де Брайля он явился поворотом. Во время проведения Первого Сольвеевского конгресса Л. де Брайлю было всего девятнадцать лет, он только что окончил гуманитарный факультет Парижского университета, получив степень лиценциата литературы по разделу истории, и стоял на пороге выбора своего пути дальнейшего развития. В это время его старший брат, уже известный физик, вместе с П. Ланжевеном был избран ученым секретарем Первого Сольвеевского конгресса и отвечал за публикацию докладов этого конгресса. По словам М. де Брайля, эти материалы конгресса вызвали «внутренний государственный переворот» у брата. Этот конгресс, как считает Ж. Лошак, послужил важным событием, повлиявшим на выбор жизненного пути Л. де Брайля: «Он вошел в физику, как приобщаются к религии, и почти по-монашески посвятил себя науке» [29, с. 46]. Знакомясь с материалами конгресса, он оказался в гуще всех актуальных вопросов физики того времени. Этот конгресс пробудил в нем интерес и потребность быть сопричаст-

ным к нарождающейся новой физике. Де Бройль понял, что существование волн и частиц при излучении, предсказываемое квантовой теорией света Эйнштейна, есть фундаментальный факт природы. С этого момента он стал размышлять над его природой. Придав световым квантам конечную массу, он завершил аналогию между частицами вещества и частицей, представляющей излучение. Тем самым был проложен путь к установлению всеобщего корпускулярно-волнового дуализма, справедливого для света и вещества.

### **2.8. «Долгое и далеко идущее размышление»: оптико-механическая аналогия**

М.-А. Тоннела являлась участницей семинара Луи де Бройля в Институте Анри Пуанкаре и под его руководством защитила диссертацию. В своем очерке о жизни и творчестве де Бройля она поставила в качестве эпиграфа следующие строки Б. 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» [291, с. 457]. Таким «долгим и далеко идущим размышлением» для де Бройля явилась оптико-механическая аналогия между механическим движением частицы и распространением света в виде луча. Оптико-механическая аналогия занимает важное место в доказательстве де Бройля о существовании фазовой волны электрона, а также при построении Э. Шредингером волновой механики. Роль аналогий, в том числе и оптико-механической, в открытии квантовой механики рассматривается в ряде работ, например, Ц. Сарангова и Б. Спасского [139], Л.С. Полака [127].

История оптико-механической аналогии начиналась в XVII веке и связана с открытием большого числа световых явлений, которые требовали создания теории, способной рассматривать их с единой точки зрения. Первый вариационный принцип геометрической оптики был предложен П. Ферма (1601-1665 гг.) в 1662 г. Рассматривая задачу отражения и преломления света, Ферма сформулировал принцип наименьшего времени. Он исходил из постулата - «природа действует наиболее легкими и доступными путями» [38, с. 7]. Принцип Ферма, говорит о том, что луч света, выходящий из заданной точки А и попадающий в заданную точку В, затрачивает по своему действительному пути время более короткое, чем то, которое понадобилось бы ему для прохождения от А до В по любому другому пути. В 1678 г. современник Ферма Х. Гюйгенс (1629-1695 гг.) в «Трактате о свете» дал доказательство принципа Ферма [49]. Для неоднородной среды, в которой волновая скорость и меняется от точки к точке, получается следующее условие: интеграл обратного значения волновой скорости, взятый по пути АВ, имеет минимум

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

А.М. Френк и Б.И. Спасский отмечают, что «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 волны» [172, с. 192]. В XVII веке оптика Гюйгенса не получила того признания, которого она заслуживала. Вслед за Ньютоном большинство ученых поддерживали и развивали корпускулярные взгляды на природу света, и волновая теория Гюйгенса была забыта.

Поиском фундаментальных принципов мироздания явилась работа французского академика П. Мопертюи (1698-1759 гг.) «Согласование различных законов природы, которые до сих пор казались несовместимыми» [111]. В 1744 г. Мопертюи впервые, ссылаясь на работы Ферма, Декарта, Лейбница, показал аналогичность законов движения светового луча и твердых тел. На примере движения светового луча в разных средах он показал, что движение по кратчайшему пути и движение за кратчайшее время не совпадают. Он конкретизирует принцип Ферма: «природа во всех своих явлениях действует всегда простейшим образом» [111, с. 25]. Мопертюи формулирует общий принцип – «выбираемый путь таков, что для него количество действия является наименьшим» [111, с. 26]. «Количество действия» у Мопертюи определяется произведением  $mus$ , где  $m$  - масса,  $u$  - скорость,  $s$  - путь, пробегаемый телом. Этот принцип он применяет и к прямому соударению тел, и приходит к обобщению: когда в природе происходит какое-нибудь изменение, необходимое для этого количество действия всегда имеет наименьшую величину. Из современников, Мопертюи поддержал Л. Эйлер (1707-1783 гг.), который показал, что под действием центральных сил тела описывают траектории, для которых интеграл достигает минимального значения

$$\int_A^B u ds = \min.$$

Для общего случая принцип наименьшего действия в 1760 г. сформулировал Ж. Лагранж (1736-1813 гг.). Решающая роль Лагранжа в развитии принципа наименьшего действия изучена в докторской работе Л.С. Полака [128]. Лагранж показал, что действие не всегда является минимальным, оно может быть и максимальным, поэтому принцип Мопертюи правильнее назвать экстремальным принципом.

Следующий этап в развитии принципов Ферма и Мопертюи был сделан в XIX веке У. Гамильтоном (1808-1865 гг.). Он хотел примирить существующие теории света - корпускулярную Ньютона и волновую Гюйгенса и показать, что движение точечной массы в силовом поле

подчиняется тому же закону, что и распространение луча света. Результаты работы по установлению оптико-механической аналогии Гамильтон опубликовал в период 1828-1837 гг.

В принципах Мопертюи и Ферма, между механикой и оптикой, существовала аналогия математической формы записи условий движения материальной точки и распространения световой волны при следовании из начальной в конечную точку. «Оба выражения представляют собой одну и ту же вариационную проблему» - писал Ю.Б. Румер [136]. Позже, в сборнике «Вариационные принципы механики» Полак (анализ вариационных принципов можно найти также в [100]) рассмотрит вопрос об использовании де Бройлем вариационных принципов в развитии идеи фазовых волн [38].

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. Гамильтон 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-Френеля. Гамильтон показал, что функция действия  $S$  удовлетворяет некоторому дифференциальному уравнению в частных производных, и, что значение этой функции дает полное решение механической проблемы:  $\vec{r} = \text{grad}S$ . Траектории пучка материальных частиц пересекают поверхность действия перпендикулярно. Если задана поверхность действия  $S$ , то  $\text{grad } S$  дает в каждой ее точке дает величину и направление импульса  $\vec{p}$  частицы. Поверхности равной фазы и поверхности равного действия образуют семейство ортогональных поверхностей к лучам и траекториям частиц.

Подробный анализ оптико-механической аналогии и динамики Гамильтона сделан Полаком. Он писал, что «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. Она как бы намекала на возможную связь движения частицы с движением волны» [38, с. 537]. Луч света может быть истолкован и как нормаль к некоторой волновой поверхности и как траектория потока световых частиц (рис. 7).

Траекторию частицы можно задать, определяя в различные моменты времени импульс  $\vec{p}$ . Аналогично, ход луча можно ассоциировать с перемещением волнового вектора  $\vec{k}$ , перпендикулярного волновому фронту. Положения волнового фронта в разные моменты

времени на рис. 7 показаны штриховыми линиями. Так как волновое число связано с длиной волны  $\lambda$ :  $k=2\pi/\lambda$ , а длина волны, в свою очередь, обратно пропорциональна показателю преломления среды  $n$ :  $\lambda=\lambda_0/n$ , где  $\lambda_0$  - длина волны в вакууме, то принцип Монпертюи может быть заменен принципом Ферма. Формальный переход от геометрической оптики к классической механике и обратно состоит в замене показателя преломления  $n$  на импульс  $p$ . Закон прямолинейного распространения лучей  $\delta \int_{1}^2 n ds = \delta n \int_{1}^2 ds = 0$ , а прямолинейное движение частицы в отсутствии внешних полей  $\delta \int_{1}^2 p ds = p \int_{1}^2 ds = 0$ . Оптико-механическая аналогия Гамильтона оставалась невостребованной.

траектория частицы

луч света

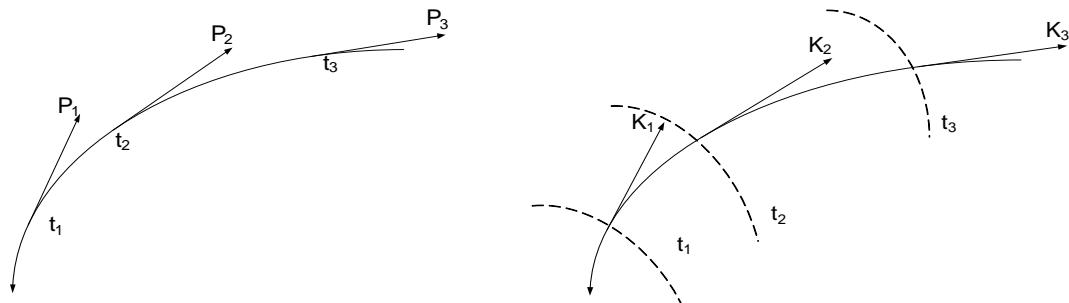


Рис. 7. Аналогия между частицей и лучом света

Позднее этой проблемой заинтересовался один из крупнейших математиков XIX века Ф. Клейн (1849-1925 гг.), он исследовал переход от волновой оптики к геометрической. Клейн писал, что «геометрическая оптика имеет дело с понятием светового луча и ... подчиняется дифференциальному уравнению в частных производных первого порядка второй степени:

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

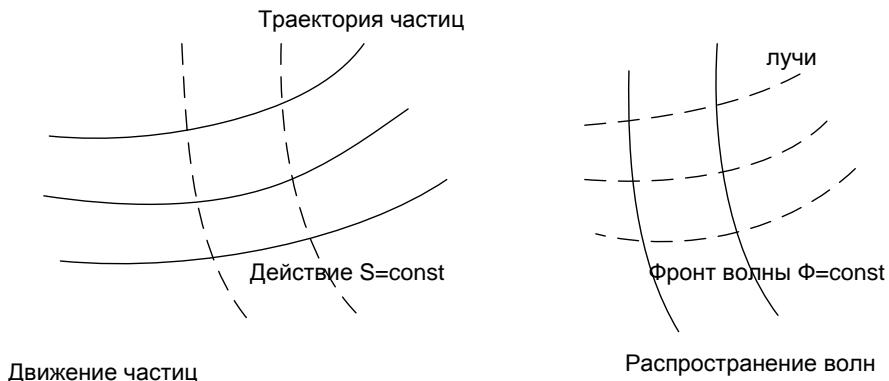
В силу этого она сначала представляется совершенно отличной от физической оптики, в центре которой стоит дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка первой степени:

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

Однако геометрическая оптика может считаться предельным случаем физической, когда рассматриваются бесконечно малые длины волн» [73, с. 513]. Уравнение (1) – уравнение эйконала, является приближением геометрической оптики, когда длина волны мала по сравнению с неоднородностями.

Ничто не мешает рассматривать движение поверхности равного действия в механике и сопоставлять его с движением поверхно-

сти равной фазы в оптике. На рис. 8 представлена аналогия траекторий частиц и лучей, а также фронта волны и поверхности равного действия.



*Рис. 8. Аналогия траектории частицы и луча волны*

Но никому не приходила идея приписывать поверхности равного действия физическую реальность, так же как после победы волновой теории света говорить о частицах света с энергией  $\hbar\omega$  и импульсом  $\hbar k$ . «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» - писал в связи с оптико-механической аналогией Ж. Лошак [104, с. 63]. Только в начале XX века вместе с квантовой гипотезой Планка, которая вводила такую величину как действие – постоянную Планка  $\hbar$ , оптико-механическая аналогия вновь стала представлять интерес. Луч, заданный волновым вектором  $k$  и частотой  $\omega$ , опишет ту же траекторию, что и материальная точка, обладающая пропорциональными  $k$  и  $\omega$  импульсом  $\vec{P}$  и энергией  $E$ :  $\vec{P} = \hbar k$ ,  $E = \hbar\omega$ .

Одна из первых идей Л. де Броиля - это аналогия между световыми квантами и электронами. Один и тот же метод рассмотрения он применяет и для вещества и для излучения, и получает фундаментальный принцип корпускулярно-волнового дуализма вещества и излучения. В первой же работе, приступая к построению волновой механики, он наделяет световые кванты массой очень малой величины, которые движутся со скоростями, зависящими от их энергии (частоты), очень близкими к скорости  $c$ .

В основе исследований де Броиля была историко-научная проблема – проблема природы света. Он не раз в своих воспоминаниях указывал на истоки первоначальных размышлений. Введенное Эйнштейном понятие световых квантов, которое использовалось им только для объяснения фотоэффекта света, а позже для рентгеновских лучей, присутствие в условиях квантования Бора целых чисел интуитивно подсказывали де Броилю путь дальнейших рассуждений.

В волновой теории для объяснения интерференции используются целые числа: целое или полу целое число длин волн, которое содержится в разности хода волн, позволяет говорить о их взаимном усилении или ослаблении. Целые числа привлекались Бором и Зоммерфельдом в законах квантования при движении электрона по круговым орбитам в атоме. Это служило подсказкой де Бройлю, нечто «волнообразное» должно быть связано с движением электронов, электроны могут перемещаться вместе с волной. Эту интуитивную идею надо было переводить в более точную математическую форму. Для математического оформления своей идеи де Бройль привлек аналогию, существовавшую между частицей (принцип Мопертюи в механике) и волной (принцип Ферма в оптике), а также следствия теории относительности. Л.С. Полак отмечает, что «воспользовавшись оптико-механической аналогией и сформулировав ее на основе математического аппарата теории относительности, де Бройль получил уравнения, которые позволили развить основные гипотезы его теории» [123, с. 43].

Двойственность «волна-частица», которая вытекала из оптико-механической аналогии, относилась только лишь к излучению. Луч света можно было представить и как нормаль к некоторой волновой поверхности, и как траекторию потока световых частиц. Но, сам корпускулярно-волновой дуализм излучения возник в результате развития Эйнштейном квантовой теории света. Эйнштейн стремился объяснить экспериментальные факты с помощью потока световых квантов, совершенно не рассматривая при этом оптико-механическую аналогию. Авторы статьи «Роль аналогий в открытии квантовой механики» пришли к выводу, что «исторически логическая связь между оптико-механической аналогией и корпускулярно-волновым дуализмом излучения не была обнаружена... эта связь не сыграла никакой роли в рассуждениях Эйнштейна по квантовой теории света» [139, с. 201]. Эту связь впервые обнаружил Л. де Бройль, и она послужила ему ориентиром в направлении распространения корпускулярно-волнового дуализма излучения на всю материю.

Для де Бройля оптико-механическая аналогия была связана с образами волны и частицы, они связаны с определенной наглядностью, и давали простор его образному мышлению. В понятиях волны и частицы неявно присутствует противопоставление противоположных сторон материи – дискретности и непрерывности. Вещество состоит из атомов, которые, в свою очередь, состоят из более элементарных частиц, а излучение представляет собой совокупность волн, которые отличаются друг от друга лишь длиной волны. Вещество может существовать без всякого излучения, и излучение может распространяться в пространстве, свободном от вещества. И, тем не менее, они взаимо-

связаны. На протяжении долгого времени, начиная с Декарта и Ньютона, существовали только корпускулярные представления о свете, которые затем сменились волновой теорией Френеля, а в XX веке вновь получили развитие корпускулярные представления в виде квантов света Эйнштейна. История развития физических представлений о свете явилась предметом исторического введения в диссертации де Бройля. Во введении де Бройль формулирует цель своего исследования: «попытаться объединить корпускулярные и волновые представления и несколько углубить понимание истинной сущности кванта» [23, с. 258].

Идея возрождения корпускулярных представлений о свете в статьях Эйнштейна возникла не в связи с оптико-механической аналогией, а как развитие квантовой гипотезы Планка. Ю.Б. Румер отмечал, что в 1905 г. Эйнштейн «совершенно независимо от оптико-механической аналогии сформулировал необходимость для объяснения новых явлений рассматривать свет как поток дискретных частиц, обладающих энергией и импульсом» [136, с. 59]. Эйнштейну для интерпретации фотоэффекта пришлось сделать вывод, что не только процесс излучения происходит квантами, но и излученная энергия состоит из частиц. Излучение взаимодействует с веществом как поток материальных частиц с энергией  $E = \hbar w$  и импульсом  $p = \hbar w/c$ . Соотношения, полученные Эйнштейном, говорят о том, что свету присущи и корпускулярные и волновые свойства, и этот «дуализм излучения неразрывно связан с самим существованием квантов» [16, с. 137]. У де Бройля в связи с этим возникал вопрос: «Не связан ли этот странный дуализм волн и частиц, примером которого так замечательно и, несомненно, явился свет, с глубокой и скрытой природой кванта действия?» [Там же]. Рассматривая двойственную природу света, де Бройль идет дальше: «Но если в теории света в течение целого столетия слишком пренебрегали понятием частицы, для того, чтобы пользоваться исключительно понятием волны, не была ли допущена обратная ошибка в теории материи? Были ли вправе физики пренебрегать понятием волны и думать только о понятии частицы?» [22, с. 8].

Историческая роль де Бройля заключается в том, что он сформулировал в 1923 г. на одном онтологическом уровне идеи корпускулярно-волнового дуализма излучения и вещества, опираясь на тесную связь оптико-механической аналогии, развитой Гамильтоном, и квантовой природы распространяющегося излучения, которую обосновывал Эйнштейн. Роль Л. де Бройля в применении оптико-механической аналогии представлена на рис. 9.

Де Бройль был убежден, что «двойственность должна быть везде, где только появляется постоянная Планка» [16, с. 138], а поскольку свойства электрона в стационарном состоянии атома описываются

соотношениями, в которых содержится эта постоянная, то у него возникло предположение, что электрон не должен ничем отличаться от света. Также как и свет, электрон должен обладать двойственными свойствами – корпускулярными и волновыми. Это обстоятельство, связанное с понятием кванта действия, по признанию де Бройля, «придавало волнующую остроту мысли» о формальной аналогии, существовавшей между траекториями частиц и световыми лучами. Луи де Бройль обратил внимание на оптико-механическую аналогию, 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.



*Рис. 9. Иллюстрация роли Л. де Бройля в применении оптико-механической аналогии*

## 2.9. Схема генезиса идеи корпускулярно-волнового дуализма

Подводем итог исследованиям генезиса идеи Луи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи. Имелось множество связанных между собой, разных по своему значению, факторов, которые вместе с гениальными способностями де Бройля привели его в 1923 г. к обоснованию этого фундаментального принципа природы. Ключевыми факторами явились следующие положения (рис. 10).

Во-первых, фундаментом для восприятия и решения Луи де Бройлем проблем, ставших актуальными в начале XX века, была французская научная мысль, которую он впитал и предпринял усилия для ее дальнейшего развития. От Декарта шло представление де Бройля о реальном физическом движении материи относительно пространства и времени. Исходя из картезианских традиций, де Бройль обратился к основным идеям оптики и механики XVII и XVIII веков, и к забытой в конце XIX века оптико-механической аналогии Гамильтона. Де Бройль обратил свое внимание на эту аналогию математической формы, существовавшую между уравнениями, описывающими дви-

жения материальной точки и световой волны. Эта аналогия стала механизмом, с помощью которого де Бройль соединил идею Планка о квантах энергии с идеей Эйнштейна о связи энергии и массы. Для этого он 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.

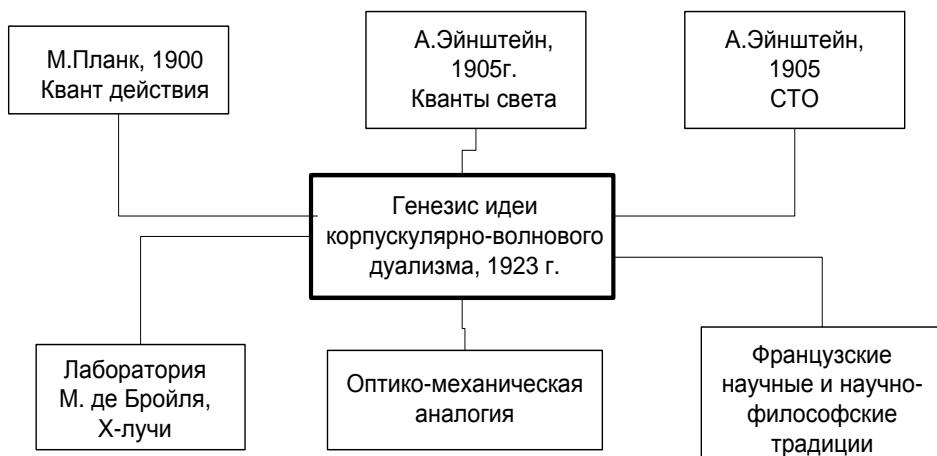


Рис. 10. Схема генезиса идеи корпускулярно-волнового дуализма Л. де Бройля

Во-вторых, в самом начале своей научной деятельности Луи де Бройль столкнулся в лаборатории М. де Бройля с вопросами природы коротковолнового излучения в виде  $X$  и  $\gamma$ -лучей. Эксперименты, связанные с явлением фотоэффекта под действием рентгеновского излучения, рождали убежденность в том, что рентгеновские лучи обладали свойствами и частиц и волн. Эти эксперименты сыграли важную роль при утверждении концепции дуализма света.

В-третьих, гипотеза А.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 его дальнейших рассуждений. Кванты света воспринимались им также, как и другие частицы (де Бройль рассматривает атом света как тело с бесконечно малой массой), что позволило утверждать о существовании фазовой волны, сопровождающей механическое перемещение материальных тел. Корпускулярно-волновой дуализм света не был сформулирован Эйнштейном, в его работах 1905-1909 гг. отстаивалась лишь корпускулярная точка зрения на природу света и было неявное указание на дуализм волна-частица. Синтетическая теория, описывающая на одном онтологическом уровне движение микрочастиц и распространение ассоциированных с этим движением фазовых волн, была создана Л. де Бройлем в 1923 г.

И наконец, без теории относительности Эйнштейна де Бройль не смог бы прийти к идеи фазовой волны. Существование фазовой

волны объяснялось де Бройлем как результат релятивистской инвариантности уравнения  $h\nu_0 = m_0c^2$ , являвшегося отправной точкой его рассуждений. Идея фазовой волны, которая заключалась в отсутствии различия между атомом вещества и атомом света, стала революционной. Равенство скорости движения частицы и групповой скорости пакета, составленного из фазовых волн, говорит о том, что фазовая волна де Бройля управляет переносом энергии. Это позволило де Бройлю объяснить волновые явления интерференции и дифракции света. Тем самым было установлено, что свет и вещество фундаментально представляют собой единую сущность.

## **ГЛАВА 3. ЗНАМЕНИТАЯ И НЕИЗВЕСТНАЯ ДИССЕРТАЦИЯ Л. ДЕ БРОЙЛЯ**

### **3.1. «Он поднял угол великого занавеса»: восприятие диссертации**

Летом 1924 г. Луи де Бройль закончил работу над своей диссертацией, отдал ее напечатать и был готов к защите, которую назначили в Сорbonne на 25 ноября 1924 г. Диссертация называлась «Исследования по теории квантов» и была опубликована в начале 1925 г. во французском журнале «Annales de Physique». Этой публикации предшествовала статья на английском языке, которая называлась «Попытка построения теории световых квантов» в журнале «Philosophical Magazine» [235]. Несмотря на то, что в истории физики диссертация Л. де Бройля имеет большое значение, ее содержание остается и сегодня малоизвестным для широкого круга и физиков и историков науки.

Восприятие диссертации среди современников де Бройля было неоднозначным. С одной стороны, А. Эйнштейн уже после успешной защиты диссертации в письме к П. Ланжевену дал ей высокую оценку, а также упомянул о волновых представлениях де Бройля в примечании к своей статье «Квантовая теория одноатомного идеального газа». Он писал: «Каким образом материальной частице или системе материальных частиц вещества можно сопоставить (скалярное) волновое поле – показал Л. де Бройль в своей работе, заслуживающей всяческого внимания» [209, с. 496]. Работы Э. Шредингера 1925-1926 гг. по волновой механике явились развитием идеи фазовой волны де Бройля, в них неоднократно давалась ссылка на диссертацию де Бройля, и в связи с этим она, бесспорно, известна.

С другой стороны, она вызвала непонимание, а идеи, высказанные в ней, казались странными. Существуют даже свидетельства о попытке навешивания ярлыка «French comedy» на эту работу де Бройля, об этом пишет и Ж. Лошак в биографии де Бройля [251, с. 152]. П. Дирак писал: «Я читал статью де Бройля (обобщающую статью на английском языке [235], в которой де Бройль изложил все ос-

новные положения диссертации — А.С.), но не воспринял волны всерьез. Я считал, что эти волны были всего лишь математическим курьезом, не имеющим никакого физического смысла. И тут я был не прав» [55, с. 683]. Благодаря замечанию Эйнштейна работы де Бройля изучались в разных научных центрах Германии. Многие физики, занимающиеся вопросами создания квантовой теории, не сразу их восприняли, их отпугивала новизна и странность идей, выдвигаемых де Бройлем. М. Борн написал в своих воспоминаниях, посвященных диссертации де Бройля: «Это был Эйнштейн, вероятно в 1925 г., который обратил мое внимание на диссертацию Л. де Бройля, сказав мне что-то вроде: «Прочтите ее, хотя может показаться, что ее писал сумасшедший, написана она солидно» [291, с. 165]. Во Франции также не было широкого отклика и развития работы де Бройля из-за практического отсутствия школы теоретической физики. Существовала поддержка лишь узкого круга, в который входили П. Ланжевен и Л. Бриллюэн. Французский физик А. Абрагам оставил в своих воспоминаниях: «Луи де Бройль сделал свое бессмертное открытие ... никто во Франции не оценил в то время необыкновенной глубины и дерзости его идей» [4, с. 68].

И даже спустя полвека после защиты диссертации де Бройлем, можно обнаружить непонимание его идей и сомнения в верности полученных де Бройлем результатов. В статье известного американского историка науки Э. МакКиннона [301], посвященной исторической реконструкции диссертации, обращается внимание на «несоответствия» в диссертации. Автор удивлен, что де Бройль с помощью введенного им релятивистского понятия фазовой волны объясняет нерелятивистские условия стационарных орбит атома и, в связи с этим, ставит вопрос: «А может быть, никто и не заметил, что король-то голый?» [301, с. 1047]. К анализу вопросов, поднятых МакКинном, мы обратимся далее.

Идеи де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи, получившие свое наиболее полное выражение в диссертации 1924 г., актуальны и привлекают внимание исследователей в настоящее время. В ряде работ [219, 316, 317, 318, 319] обсуждаются различные интерпретации квантовой механики, существовавшие к 1927 г., проводится историческая реконструкция работы Пятого Сольвеевского конгресса, на котором победила копенгагенская интерпретация квантовой механики, и уделяется большое внимание диссертации де Бройля. Краткий анализ диссертации можно найти в работах Л.С. Полака [123, 124, 127], в исторических исследованиях М. Джеммера [53], Д. Мехры [306].

Диссертация де Бройля, единственное издание которой на английском языке состоялось лишь в 1924 г. для последующих поколений

физиков XX века во многом осталась неизвестной. Это объясняется как слабым интересом к самой фигуре Луи де Бройля, так и отсутствием работ, которые явились бы успешным развитием идей, изложенных в диссертации. В основном работы Шредингера стали развитием одной идеи фазовых волн (волн материи) де Бройля, но в диссертации содержались и другие, новые для физики того времени, понятия.



Поль Ланжевен, 1911 г.

Мы остановимся на анализе новых идей, впервые появившихся в диссертации Л.де Бройля, уделяя внимание тем вопросам, которые де Бройль сформулировал, но на которые не нашел ответов. Кроме этого, публикуя перевод отзыва членов комиссии, перед которыми Л. де Бройль защищал свою диссертацию [прил. 1], полагаем тем самым опровергнуть миф, существующий в ряде исторических исследований о скептическом отношении экзаменационной комиссии к диссертации де Бройля.

В истории квантовой механики осталась фраза из письма Эйнштейна к П. Ланжевену по поводу диссертации де Бройля: «Он поднял угол великого занавеса», а также утверждение, что без этой оценки диссертация не была бы принята [4, с. 68]. Письмо было написано Эйнштейном 16 декабря 1924 г. и в нем есть слова: «Работа де Бройля произвела на меня большое впечатление. Он поднял угол великого занавеса. Я в своей работе получил результаты, которые, кажется, опираются на его достижения. Передайте ему, пожалуйста, при встрече мое глубокое уважение и симпатию. Я хочу сделать доклад о его идеях на нашем коллоквиуме». Этот фрагмент письма, копия которого хранится в Фонде Л. де Бройля, приводится ниже.

Перевод фразы из этого письма «Er hat einen Zipfel der grossen Schleiers gelüftet» широко известен как «Он поднял угол великого занавеса». Защита диссертации состоялась за три недели до этого письма – 25 ноября, и очевидно, что отзыв Эйнштейна не мог оказать влияния на решение экзаменационной комиссии. 16 декабря 1924 г. Эйнштейн написал еще одно письмо – Лоренцу, в котором также ото-

звался о диссертации «младшего брата известного нам Мориса де Бройля»: «он сделал интересную попытку интерпретации правил квантования Бора-Зоммерфельда. Я полагаю, что это едва заметный луч света, чтобы осветить эту самую трудную из наших физических загадок» [219, с. 51].

Berlin. 16. XII. 24.

Lieben Langewiss!

Ich freue mich, eine Gelegenheit zu haben, Ihnen zu schreiben.  
Denn dabei sehe ich Sie vor mir, wie wenn wir zusammen  
sässen und plauderten, wie es hoffentlich bald wieder sein wird.  
Die Arbeit von De Broglie hat grossen Eindruck auf mich  
gemacht. Er hat einen Tippel des grossen Schlesers gehifftet.  
Doch komme ich einer neuen Arbeit zu Resultaten, die die seinen  
zu stützen scheinen. Fügen Sie ihm bitte meine Hochachtung  
und Sympathie, wenn Sie ihn sehen. Ich will in unserem  
Kolloquium über seine Thesen vortragen.

Фрагмент письма А. Эйнштейна к П. Ланжевену

В отзыве на диссертацию, подписанном П. Ланжевеном и Ж. Перреном, который хранится в Фонде Луи де Бройля в Париже, можно прочитать о том, какое большое значение, по мнению комиссии, имеет выполненная работа, они дают ей высокую оценку: «Работа господина Луи де Бройля представляет существенное достижение в решении проблем современной физики» [прил. 1].

### 3.2. Анализ диссертации

#### 3.2.1. Обоснование выдвигаемых идей

Итак, диссертация явилась тем обещанным де Бройлем завершением ранее опубликованных результатов в трех статьях 1923 г. В ней он поставил задачу систематизировать полученные им новые результаты, дать подробное обоснование выдвигаемым постулатам, привести доказательства и сделать выводы. Изучая диссертацию, невозможно согласиться с утверждением МакКиннона: «Я полагаю, что диссертация де Бройля является блестящей, но поспешной и, в конечном счете, безуспешной попыткой дать общую согласованность идеям, которые он развивает» [301, с. 1050]. Поводом для таких заключений, вероятно, могут служить слова самого де Бройля, которы-

ми он заканчивает диссертацию: «... я развел новые идеи, которые, быть может, помогут ускорить необходимый синтез, объединяющий физику излучений, так странно разделенную в настоящее время на две области, где царят две противоположные концепции: корпускулярная и волновая. Я предчувствовал, что с помощью принципов динамики материальной точки, если правильно их анализировать, можно, без сомнения, выразить распространение и согласованность фаз, и старался, насколько мог, найти из этих идей объяснение некоторых загадок, выдвигаемых теорией квантов» [29, с. 324]. В диссертации, действительно, содержится много интуитивных предположений, рассуждений, построенных на существующих аналогиях, она необычна с точки зрения современных требований, предъявляемых к диссертационной работе. В статье [329], посвященной пятидесятилетию со дня опубликования де Бройлем в «Philosophical magazine» результатов диссертации, приводятся аргументы современного редактора научного журнала по поводу требований, предъявляемых к научной публикации в конце XX века, главным среди которых является согласованность полученных результатов с существующими экспериментальными фактами и теориями. По этим критериям статья де Бройля не смогла бы появиться в современном научном журнале, т.к. она вся построена на предположениях, интуитивных догадках и рассуждениях автора. И из этого можно сделать следующий вывод: без таких публикаций, построенных на идеях, у которых пока нет экспериментальных доказательств, невозможно развитие физики. Именно эта диссертация, писал М. Борн, «содержала идеи, представленные потом во всех работах по квантовой теории, включая и мои, и они знакомы любому, кто занимается физикой, ... вдохновение этого произведения является таким же удивительным, как простота и ясность его аргументации» [291, с. 165].

Диссертация представляет собой исследование, состоящее из исторического обзора, семи глав, выводов и заключения.

Исторический обзор преследует цель не только осветить развитие и состояние вопроса, но и обосновать с помощью анализа историко-научных данных основные идеи своей работы. В беседе с Б.Г. Кузнецовым де Бройль признавался: «Отправной точкой в создании волновой механики послужила историко-научная проблема» [89, с. 107]. С одной стороны, существовала история представлений о природе света: корпускулярные представления Ньютона и волновые представления Гюйгенса, затем Юнга и Френеля. Корпускулярная и волновая природа света имели свои экспериментальные доказательства, и две точки зрения на природу света с переменным успехом существовали на протяжении столетий. В конце XVIII века благодаря работам Т. Юнга (его работы по волновой оптике были встречены чрезвычайно вра-

ждебно приверженцами корпускулярной теории, «он почти в полном одиночестве защищал свои взгляды» - пишет Л.С. Полак [126, с. 76]) и позднее теоретическому объяснению Френелем явлений, наблюдавших Юнгом, начинается новый этап триумфа волновой теории света [123]. При этом существовала и корпускулярная теория со своим объяснением экспериментальных фактов. «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 физических представлениях, как о природе света, так и о наблюдаемых экспериментальных физических явлениях» - отмечал в своей работе Л.С. Полак [123, с. 24].

В 1905 г. в связи с теорией квантов света Эйнштейна этот вопрос вновь приобрел свою актуальность. В 1921-1923 гг. появился ряд работ, в которых с помощью квантов света, обладающих энергией и импульсом, объяснялись явления рассеяния света на свободных электронах – эффект Комптона, а также дифракция света на бесконечной решетке (В. Дуан). Но в то же время оставались явления, такие как дифракция Френеля, дисперсия света, которые объяснить с помощью квантов света не удавалось. Зоммерфельд писал, что де Бройль преследовал цели, противоположные Дуану: «Де Бройль хотел прийти к пониманию квантовых условий в качестве следствий из интерференционных явлений» [62, с. 50]. Как совместить корпускулярное и волновое представление в единой синтетической теории? Поиск такой теории естественно вел к рассмотрению общих точек в теориях, объясняющих, с одной стороны, движение частиц, а с другой, распространение волн в пространстве. Де Бройль хорошо знал, что ньютоновская механика была сформулирована Мопертюи с помощью принципа наименьшего действия, а законы геометрической оптики обобщены Ферма с помощью принципа наименьшего времени, по форме напоминающего принцип наименьшего действия в механике. В связи с этим де Бройль задается вопросом: «Если две теории, основанные на идеях, кажущихся совершенно различными, объясняют с одинаковым изяществом одну и ту же экспериментально доказанную истину... то действительно ли противоположны обе точки зрения, и не является ли эта противоположность лишь следствием того, что наши усилия синтезировать их оказались недостаточными» [29, с. 255]. Эта ремарка, конечно, является намеком на цель диссертации, которая заключается в осуществлении такого синтеза корпускулярных и волновых представлений. После этого де Бройль переходит к теории

Максвелла, которая показала, что всю оптику можно рассматривать как часть электромагнетизма. Работы Х.А. Лоренца ввели в теорию Максвелла понятие о дискретности электричества, и тем самым появилась «надежда на близкий и полный синтез всей физики» [Там же].

Теория квантов занимала мысли де Бройля еще с 1911 г., когда он ознакомился с материалами I Сольвеевского конгресса, публикацию которых готовил в Париже его старший брат Морис де Бройль. С этого момента природа «таинственных квантов» была главным объектом внимания де Бройля. В историческом обзоре в диссертации он уделяет теории квантов наибольшее внимание. Он пишет, что теория фотоэффекта Эйнштейна равносильна возрождению корпускулярной теории света Ньютона, в тоже время, существует волновой аспект теории света, который подтверждается явлениями интерференции и дифракции. Де Бройль отмечает также недавнее объяснение комптоновского рассеяния света, которое можно сделать только с корпускулярной точки зрения. В конце своего обзора он заключает, что, «кажется, настал момент попытаться объединить корпускулярные и волновые представления и несколько углубить понимание истинной сущности кванта. Это и было проделано нами недавно, и основной целью настоящей работы является более полное рассмотрение вводимых нами новых идей» [29, с. 258]. Де Бройль смотрит на свою собственную работу как на синтез более ранних теорий динамики и оптики, синтез, подтвержденный накопленными экспериментальными доказательствами, а также представлениями о квантах энергии Планка и квантах света Эйнштейна.

### **3.2.2. Релятивистские фазовые волны**

Первая глава диссертации называется «Фазовая волна». Этот термин появился впервые в работе «Кванты света. Дифракция и интерференция» и является ключевым во всех дальнейших рассуждениях де Бройля. Мотивацией для де Бройля при постулировании фазовой волны служила кажущаяся асимметрия в природе вещества и излучения: электромагнитные волны имели свойства частиц, это утверждалось Планком в 1900 г. и Эйнштейном в 1905 г., но электроны всегда рассматривались, как частицы и не было никаких предпосылок для существования у них волновых свойств.

Де Бройль утверждает: «согласно какому-то великому закону природы, каждая порция энергии массы  $m_0$  связана с периодическим процессом частоты  $v_0$  уравнением

$$\hbar v_0 = m_0 c^2.$$

... Эта гипотеза является основой нашей системы: ценность ее, как и всякой гипотезы, заключается в важности тех выводов, к которым она приводит» [29, с. 260].

В работах Б.Г. Кузнецова неоднократно подчеркивалось, что «применение релятивистского соотношения между энергией и массой – одна из самых важных с исторической точки зрения идей де Бройля. Его теория оказывается в известном смысле обобщением релятивизма и квантовой теории» [94, с. 175]. Релятивистская энергия покоя  $E = m_0 c^2$  связывалась им с массой покоя, одинаковой для каждого сорта квантов или атомов энергии. К моменту формирования теории де Бройля выражение  $E = h\nu$  имело совершенно другой смысл. Планк предложил рассматривать для осциллятора с частотой  $\nu$  процесс испускания и поглощения энергии только порциями, кратными  $h\nu$ . Эйнштейн в 1905 году выдвинул гипотезу о том, что порции лучистой энергии частоты  $\nu$  существуют не только при излучении и поглощении, но и независимо в пространстве. Де Бройль предложил новое обобщение и интерпретацию уравнению  $E = h\nu$ . Прежде всего, он применил его к любым микрочастицам. Де Бройль представил себе картину расширенной на все пространство пульсирующей, неделимой энергии. В классической теории электрона масса является следствием электромагнитного поля. Поле содержит энергию, и энергия электрона распределена в пространстве, а совсем не сконцентрирована в маленькой частице. Де Бройль пишет: «То, что характеризует электрон как атом энергии, это не маленькое место, занимаемое им в пространстве, а тот факт, что он неделим, что он не может быть разбит на части, что он представляет собой единство» [23, с. 260]. Де Бройль предположил, что в собственной системе координат «атома энергии» все его части пульсируют с одной и той же частотой  $\nu_0 = m_0 c^2 / h$ .

Такой пульсирующий «атом энергии» не похож на распространяющуюся волну. Если пытаться представить себе волну, то придется представить себе такие пульсации как волны с бесконечной длиной волны и неограниченной скоростью, которые распространяются мгновенно в каждую точку среды. Или, как предложил де Бройль в статье «О собственной частоте электрона», написанной в 1925 г. после защиты диссертации, это можно описать как стоячую волну, которая есть результат суперпозиции расширяющихся и сжимающихся сферических волн. Амплитуда стоячей волны имеет максимум в самой материальной точке, и постепенно уменьшается до нуля во внешнем пространстве. Если частица движется, то ее движению соответствует распространение бегущей волны с определенной фазовой скоростью и длиной волны. В атоме волны, соответствующие отдельным электронам, со скоростями и длинами волн, зависящими от величины силового поля, образуют систему стоячих волн с частотами, характерными для данного сорта атомов. Эти собственные частоты заменяют уровни энергии квантовой теории Бора. Условие частот Бора можно

заменить предположением, что частоты электромагнитных волн, излучаемых атомом, определяются биениями стоячих волн де Бройля.

М. Джеммер приводит любопытные данные [53, с. 237] о возможных предшественниках идеи де Бройля о волнах материи: Н. Деллингсгаузен (его основной труд был опубликован в 1872 г. под названием «Основы колебательной теории природы») отождествлял атомы со стоячими волнами, а движение частиц интерпретировал как колебательный процесс. Но де Бройль нигде не упоминает о Деллингсгаузене и, вероятно, он ничего не знал о его работах.

### 3.2.3. Закон фазовой гармонии

Предположив существование у частицы внутренней частоты, де Бройль обращает внимание, что это соотношение определяет частоту внутреннего процесса только в собственной системе отсчета. При переходе в другую систему оно нарушается, поскольку не является лоренц-инвариантным. Если тело движется со скоростью  $v = \beta c$  относительно неподвижного наблюдателя, то его энергия увеличивается

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

а частота хода внутренних часов уменьшается

$$v = v_0 \sqrt{1 - \beta^2}.$$

Дальнейшие рассуждения де Бройля о существовании некоего периодического процесса внутри частицы становились бесперспективными, он писал: «Здесь есть трудность, которую я долго не мог преодолеть; мне удалось разрешить ее с помощью следующей теоремы, которую я назову теоремой гармонии фаз». Де Бройль смог доказать, что для любого наблюдателя, который рассматривает движущийся квант энергии со скоростью  $v$ , пульсации энергии будут представлять собой волны, распространяющиеся со скоростью  $V$ . Частота этих волн равна

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Теорема о фазовой гармонии де Бройля: «Периодический процесс, связанный с движущимся телом, частота которого для неподвижного наблюдателя равна  $v_1 = (m_0 c^2 / h) \sqrt{1 - \beta^2}$ , кажется ему постоянно находящимся в одной фазе с волной частоты  $v = (m_0 c^2 / h) (1 / \sqrt{1 - \beta^2})$ , распространяющейся в том же направлении, что и движущееся тело, со скоростью  $V = c / \beta$ » [23, с. 261].

Де Бройль добился своего, теперь в его уравнении можно убрать «нолики»:  $hv = mc^2$ . Он доказал, что выражение  $E = hv$  может быть применено как к покоящемуся, так и двигающемуся электрону. После

этого де Бройль рассуждает о природе волны, которая распространяется со скоростью обязательно большей, чем  $c$ , ее скорость равна  $V = c/\beta$  (рис. 8). Эта волна не переносит энергии, она не материальна. Это фазовая волна – такой вывод делает де Бройль.

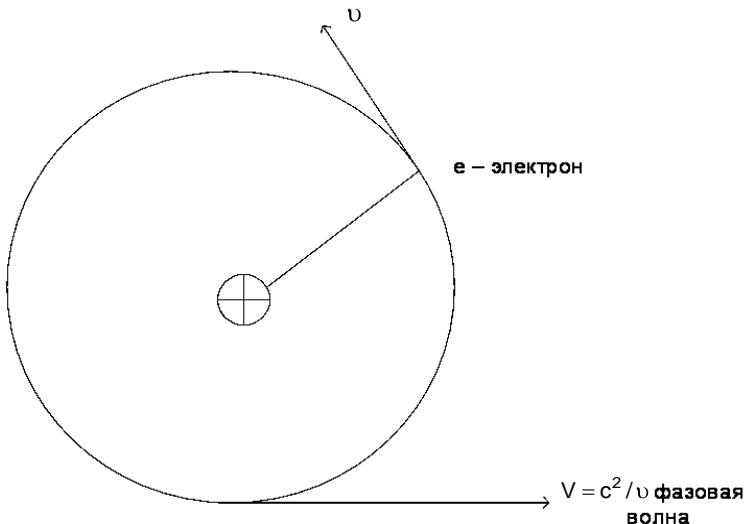


Рис. 11. Электрон и его фазовая волна

Де Бройль назвал эти волны фазовыми из-за совпадения фазы  $\phi_1$  внутреннего волнового процесса с частотой  $v_1 = (m_0c^2/h)\sqrt{1-\beta^2}$  и фазы  $\phi$  волнового процесса, связанного с перемещением в пространстве массы, частота которого  $v = (m_0c^2/h)(1/\sqrt{1-\beta^2})$ . Если частица для момента времени  $t=0$  находилась в точке  $x=0$ , затем начала двигаться вдоль оси  $x$  со скоростью  $v = \beta c$ , то вместе с ее движением в пространстве появляется волна с фазовой скоростью  $V = c/\beta$ . Через время  $t$  для двух волновых процессов получается совпадение фаз  $\phi_1$  и  $\phi$ , которое впервые показал де Бройль:

$$\phi_1 = v_1 t = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1-\beta^2} \frac{x}{\beta c},$$

$$\phi = v(t - \frac{\beta x}{c}) = \frac{m_0 c^2}{h} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (\frac{x}{\beta c} - \frac{\beta x}{c}) = \frac{m_0 c^2}{h} \sqrt{1-\beta^2} \frac{x}{\beta c}.$$

Здесь следует обратить внимание на ряд особенностей, связанных с понятием фазовых волн.

Во-первых, идея фазовых волн родилась из релятивистских соображений эквивалентности массы и энергии, а также замедления времени. Важно, что формулу длины фазовой волны, которую во всех учебниках называют длиной волны де Бройля,  $\lambda = V/v = h/(m_0 v / \sqrt{1-\beta^2}) = h/p$ , где  $p$  – релятивистский импульс частицы, де Бройль не вводил, а использовал только частоту и фазовую скорость распространяющейся фазовой волны.

Во-вторых, в его концепции у внутреннего процесса с частотой  $\nu_0$  отсутствует скорость и длина волны. В 2011 г. была осуществлена попытка косвенного обнаружения этой частоты внутренних часов электрона. В экспериментальной работе исследовалось электронное туннелирование в кристаллах кремния [311]. Первые полученные результаты говорят о существовании этой частоты  $\nu_0$ , введенной де Бройлем в 1923 г.

В-третьих, фазовые волны являются релятивистскими волнами, они – следствие релятивистских соотношений энергии и времени. В своей книге «Введение в волновую механику» де Бройль показывает, как благодаря преобразованиям Лоренца можно получить фазовый множитель у волны в движущейся системе отсчета  $xuz$ , если в собственной системе он имел вид  $\cos 2\pi\nu_0 t_0$ . Если частица движется со скоростью  $v = \beta c$  вдоль оси  $z$  и обладает собственной частотой  $\nu_0$ , то волна приобретет вид:  $\cos 2\pi\nu_0 [t - \beta z / (c / \sqrt{1 - \beta^2})]$ . Обозначив  $\nu = \nu_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$ , и  $V = c / \beta = c^2 / v$ , получим  $\cos 2\pi\nu(t - z/V)$ , т.е. в системе  $xuz$  волна распространяется с частотой  $\nu$  и фазовой скоростью  $V$ . Де Бройль пишет, что этот результат «получается просто и непосредственно из способа преобразования времени по теории относительности, при переходе из одной Галлилеевой системы в другую» [22, с. 43].

И, наконец, эти волны являются нематериальными волнами. Физическая природа этих волн оставалась загадкой: их нельзя было отнести ни к механическим, ни к электромагнитным волнам. Волны де Бройля не переносят энергии и не требуют среды для своего распространения, но их скорость зависит от инерциальной системы наблюдателя.

Де Бройль неоднократно обращался к объяснению своей первой гипотезы о фазовой волне: «...я предположил, что частица аналогична маятнику, т.е. обладает внутренними колебаниями, и что, будучи неразрывно связана с волной, она перемещается с этой волной таким образом, что остается постоянно в фазе с ней» [22, с. 4]. В первой главе диссертации де Бройль дает наглядный пример колебаний грузиков, подвешенных на пружинах, к круглой площадке большого радиуса. Пружины с грузом одинаковы и имеют один и тот же период. Де Бройль, развивая свои рассуждения, дает зрительный образ волны для наблюдателя, находящегося внутри этой системы, затем для наблюдателя, движущегося равномерно со скоростью  $v = \beta c$ . Этот пример говорит о его сугубо образном мышлении, отличительной чертой его научного творчества была наглядность. Для де Бройля модель должна быть конкретной и иметь наглядный образ в физическом пространстве.

Идея волн, ассоциированных с материальными частицами, высказывалась ранее Марселем Бриллюэном, и его работа [250] была известна Л. де Бройлю. Де Бройль находился в дружеских отношениях с его сыном Леоном Бриллюэном еще со времен военной службы. После они вместе слушали лекции М. Бриллюэна в Коллеж де Франс, обсуждали свои первые научные работы. М. Бриллюэн рассматривал движение частицы (он назвал ее «point mobile» - движущаяся материальная точка) в упругой среде и показал, что она движется быстрее, чем образующиеся упругие волны. Движение предполагалось квазипериодическим и ограниченным сферической областью, подобно квазипериодическому движению электрона, удерживаемого кулоновской силой со стороны ядра, чтобы оставаться в определенной области пространства. Частица периодически догоняет волны, которые она порождает в пространстве, но у Бриллюэна дальнейшего развития эта идея не получила. Де Бройль, конечно, мог применить анализ Бриллюэна к световым квантам, так же как и к электронам. Атом света, подобно «point mobile» Бриллюэна, может обладать ассоциированной волной, которая взаимодействует определенным образом с частицей.

### **3.2.4. Волновые пакеты и групповая скорость**

Цель, которую поставил себе де Бройль, заключалась в установлении определенного соотношения между распространением некой волны и движением частицы. На этом пути де Бройль получил, по его словам, «самое важное следствие, касающееся соотношения между скоростью частицы и скоростью связанной с ней волны» [30, с. 140]. Это следствие есть равенство скоростей группы волн и частицы, оно было получено де Бройлем при рассмотрении волновых пакетов, которые образуются в пространстве при распространении фазовых волн. Заслугу де Бройля в этом решении подчеркивал Зоммерфельд: «де Бройль сумел показать, что квантовые условия могут быть выведены из постулата, согласно которому цуг волн, ассоциируемый с частицей, должен содержать в себе все длины волн в некоторой узкой области частот» [62, с. 50].

В волновой теории, наряду с монохроматическими волнами, существуют волновые пакеты, которые получаются при наложении плоских монохроматических волн с очень близкими частотами, длинами волн и направлениями распространения. В результате суперпозиции таких волн образуются биения или волновые пакеты. На самом деле монохроматические волны - это абстракция, реально существуют лишь волновые пакеты или группы волн с частотами, лежащими внутри небольшого спектрального интервала вблизи основной частоты. Размеры группы волн ограничены, так как в центре группы волн все составляющие синфазны, а вне ее границ они взаимно уничтожаются в результате интерференции. Группа волн в целом обладает скоро-

стью, она называется групповой скоростью, отличной от скорости распространения отдельных волн, составляющих эту группу, значение этой скорости определяет средняя или центральная частота группы волн. Зависимость групповой скорости  $U$  от частоты  $v$  описывается формулой Рэлея

$$\frac{1}{U} = \frac{d(v/V)}{dv} = \frac{1}{V} \frac{d(nv)}{dv}.$$

Если отсутствует дисперсия среды, в которой распространяются волны, т.е.  $\partial n / \partial v = 0$ , то  $U=V$  групповая скорость совпадает с фазовой.

Рассмотрим группу, образованную фазовыми волнами с близкими частотами. Поскольку фазовая скорость  $V$  волн связана со скоростью движущегося тела  $v = \beta c$ :  $V = c / \beta$ , то, применяя формулу Рэлея к частоте  $v = (m_0 c^2 / h)(1 / \sqrt{1 - \beta^2})$ , можно получить связь групповой скорости фазовых волн, в случае суперпозиции волн с частотами в интервале от  $v$  до  $v + \delta v$ , и скорости движущегося тела, заключенной между  $\beta$  и  $\beta + \delta\beta$ . Формулу Рэлея можно записать в виде:

$$U = \frac{dv/d\beta}{d(v/V)/d\beta}.$$

Взяв производные

$$\frac{dv}{d\beta} = \frac{m_0 c^2}{h} \frac{\beta}{(1 - \beta^2)^{3/2}},$$

$$\frac{d(v/V)}{d\beta} = \frac{m_0 c}{h} \frac{d(\beta / \sqrt{1 - \beta^2})}{d\beta} = \frac{m_0 c}{h} \frac{1}{(1 - \beta^2)^{3/2}},$$

и, разделив уравнения их друг на друга, получим

$$U = \beta c = v.$$

Групповая скорость равна скорости движущейся частицы. Получив этот результат, де Бройль делает замечание: «В волновой теории рассеяния, если исключить зоны поглощения, скорость переноса энергии равна групповой скорости. Хотя здесь рассмотрение ведется с другой точки зрения, мы получаем аналогичный результат, так как скорость тела есть не что иное, как скорость перемещения энергии» [23, с. 264].

Де Бройль пишет: «Это замечательное совпадение знаменательно, ибо оно означает, что частица в процессе движения остается связанной со своей группой волн. Но сверх того, общая теория колебаний гласит, что групповая скорость есть не что иное, как скорость переноса энергии волнами. Поскольку в нашей дуалистической концепции энергия приписывается частице, то естественно, что групповая скорость связанных с частицей волн должна быть равна скорости частицы» [Там же, с. 140]. Де Бройль отождествил механическую скоп-

рость движения частицы  $v$  со скоростью движения центра группы волн *У. Я.И. Френкель* в своей книге «Волновая механика» писал, что сведение частиц к волнам, которое «представляется столь соблазнительным» из-за совпадения скорости частиц и групповой скорости, является невозможным, и что это совпадение должно иметь совершенно другой физический смысл [175]. В квантовой механике частица связана с системой волн с помощью понятия вероятности, и детерминистическое описание движения частицы, предполагающее возможность точной ее локализации в пространстве в любой момент времени, не представляется возможным.

В работах [269, 301, 249] отмечается, что доказательство де Бройля того, что если квант энергии ассоциируется с группой фазовых волн, то групповая скорость такого возмущения равна скорости кванта, придает его общей схеме последовательность и физическую согласованность. Тем не менее, вокруг этих понятий, связанных с распространением группы фазовых волн, возникали следующие вопросы. Каким образом можно сопоставить кванту энергии отдельную длину волны или частоту, в то время как он представляется суперпозицией волн с разными близкими частотами? Для волновой группы внутренняя неопределенность длин волн  $\lambda$  порождает в соответствии с соотношением  $p=h/\lambda$  соответствующую неопределенность в импульсе частицы. Тогда каким образом групповая скорость имеет определенное значение?

Используя современные обозначения, авторы [249] показали, что если ввести волновую группу как суперпозицию неограниченного количества волновых гармоник с разбросом волновых чисел  $k = 2\pi/\lambda$  и угловой частоты  $\omega = 2\pi\nu$ , то групповая скорость равна

$$U = \left( \frac{d\omega}{dk} \right)_{k=k_0},$$

где  $k_0$  - центр области  $\Delta k$ . Для дисперсной среды  $\omega = \omega(k)$ ,  $V = V(k)$ , а также скорость микрочастицы  $v$  из-за связи с фазовой скоростью должна быть функцией  $k$ . Используя определение  $V = \omega/k$ , получим зависимость скорости частицы от волнового числа  $v = c^2 k / \omega$ . Откуда

$$\Delta v \sim \frac{dv}{dk} \Delta k = c^2 \frac{d}{dk} \left( \frac{k}{\omega} \right) \Delta k.$$

Можно показать, что соответствующий разброс есть и у групповой скорости  $U$ . Если представить  $\Delta U \sim (d^2\omega/dk^2)\Delta k$ , а дисперсионное уравнение записать в виде  $\omega = [c^2 k^2 + (m_0/h)^2]^{1/2}$  (вывод его дан в [249, с. 361]), то можно получить

$$\Delta U \sim c^2 \frac{d}{dk} \left( \frac{k}{\omega} \right) \Delta k.$$

Таким образом, для дисперсной среды существует согласованность между разбросом значений групповой скорости  $\Delta U$  и скорости движущейся частицы  $\Delta v$ .

На праздновании своего 80-летия Л. де Бройль сказал словами философа А. Бергсона: «Человек за свою жизнь не имеет более одной великой идеи» и добавил: «Если я имел такую идею, то это, конечно, закон фазовой гармонии, который был выражен в первой Главе докторской диссертации» [294, с. 26]. Закон фазовой гармонии не вошел в учебники, описывающие основы корпускулярно-волнового дуализма, потому что физический смысл фазовой волны, без которой невозможно построение волновой механики, остался неясен. А. Эйнштейн писал: «Математическая простота работы де Бройля... чрезвычайно удивительна.... Математические операции в задаче, касающейся волн вещества, чрезвычайно просты и элементарны, но ее фундаментальные идеи простираются глубоко и далеко» [197, с. 225]. В этом также заключается огромное значение докторской диссертации де Бройля, в которой получены важные результаты, послужившие дальнейшему развитию физики. Но в ней также поставлены вопросы, ответы на которые ждут своего часа. Корпускулярно-волновая природа материи, открытая де Бройлем, является важным элементом физической картины мира. Квантовая механика придала волнам де Бройля, т.е. фазовым волнам, смысл волн вероятности. В диссертации де Бройля остались невыясненные вопросы: Что такое фазовая волна? Нужна ли для ее распространения некая среда? Как фазовая волна влияет на распространение частицы? Что подразумевается под «внутренним периодическим процессом»? Почему в атоме фазовая волна движется по кругу? Частично ответы на эти вопросы были даны в копенгагенской интерпретации квантовой механики, которая явилась завершением поисков последовательной теории атома. Дуализм волна-частица, открытый де Бройлем, является основой индетерминизма в квантовой механике [21, 51, 169].

### **3.2.5. Задачи, решенные с помощью фазовых волн**

Ассоциация волны с любой материальной частицей для де Бройля не была связана с выяснением природы колебательного процесса внутри частицы, он поставил для себя задачу согласовать законы Планка  $E = h\nu$  и Эйнштейна  $E = mc^2$ . Де Бройль размышлял над вопросами: Что такое вещество? Что такое свет? Свет может быть преобразован в вещество и вещество в свет. Вещество так же, как и свет, должно обладать волновыми свойствами. В оптике распространение световой волны описывается принципом Ферма, а в механике движение материальной точки определяется принципом Мопертюи. В этих принципах существовала аналогия математической формы записи условий движения материальной точки и светового луча, которая получила развитие в работах У.Гамильтона [127]. В диссертации де Бройль не ссылается на работы Гамильтона по оптико-механической аналогии, Ж.Лошак объясняет это тем, что «в годы юности де Бройль

не знал об оптико-механической аналогии Гамильтона, но он изучал его динамику» [104, с. 77].

При анализе работ, предшествующих исследованиям де Бройля, как, правило, рассматривают оптико-механическую аналогию Гамильтона. Но эта аналогия не затрагивала проблемы физической природы света, она нужна была де Бройлю как инструмент для установления новой динамики квантов: «Принцип Ферма, примененный к фазовой волне, идентичен принципу Мопертюи, примененному к движущемуся телу. Возможные динамические траектории движущегося тела идентичны с возможными лучами волны» [29, с. 276].

Глава II диссертации называется «Принцип Мопертюи и принцип Ферма». Здесь де Бройль формулирует цель: «обобщить результаты главы I на случай движущегося тела, перемещение которого непрямолинейно и неравномерно». Он рассматривает движение материальной точки в силовом поле и распространение связанной с ней фазовой волны. Этот этап был необходим де Бройлю, чтобы впоследствии перейти к применению идеи согласованного движения электрона и его фазовой волны в атоме Бора. Принцип Ферма, примененный к фазовой волне, идентичен принципу Мопертюи, примененному к движущейся материальной точке, и, следовательно, динамически возможные траектории движущейся точки идентичны возможным лучам волны. Этой идеей непосредственно определяется путь исследования. «С одной стороны, мы исследуем механический принцип наименьшего действия в его классических формах Гамильтона и Мопертюи в релятивистской динамике, а с другой стороны, с очень общей точки зрения,- распространение волн и принцип Ферма. В этом случае нам придется представить себе некоторый синтез этих двух исследований, синтез может быть спорный, но теоретическое изящество его неоспоримо» [29, с. 269].

Де Бройль обсуждает распространение волн и принцип Ферма с позиций пространства-времени. Он рассматривает функцию  $\sin\phi$ , предположив, что дифференциал  $\phi$  зависит от переменных  $x^i$  пространства и времени. В пространстве-времени имеется бесконечное число мировых линий, вдоль которых функция  $\phi$  постоянна. Де Бройль решает задачу: «Р и Q – две точки пространства-времени. Если мировой луч пройдет через эти две точки, то какой закон будет определять его форму?». Он записывает вариационный принцип для мирового луча в форме  $\delta \int_P^Q d\phi = 0$ . В результате решения де Бройль по-

лучает идентичную запись принципа Мопертюи и Ферма и приходит к выводу о том, что траектории движущейся материальной точки идентичны лучам фазовой волны. Он добавляет: «Нам представляется, что такая идея глубокой связи между двумя принципами геометриче-

ской оптики и динамики является чрезвычайно ценной для отыскания пути к синтезу волн и квантов» [Там же, с. 276]. Де Бройль развивает рассуждения о мировом векторе  $O$ , ассоциированном с волной, временная компонента которого пропорциональна частоте, и четырехмерном импульсе  $I$ , ассоциированном с механическим движением материальной точки, пропорциональном энергии. В результате он постулирует соотношение, исходя из аналогии форм, что оба вектора пропорциональны друг другу и коэффициентом пропорциональности является постоянная Планка:  $O^i = (1/h)I^i$ , ( $i=1,2,3,4$ ).

Де Бройль в этой же главе рассматривает некоторые частные случаи: свободная частица, частица в электростатическом поле и частица в электромагнитном поле. Он рассчитывает фазовую скорость, которая зависит от электромагнитных потенциалов, и замечает, что распространение фазовой волны во внешнем поле зависит от заряда и массы движущегося тела. Де Бройль записывает уравнение

$$\hbar v = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} + e\varphi \quad (3)$$

и получает для случая электрона с зарядом  $e$  и скоростью  $v$  в электростатическом поле с потенциалом  $\varphi$  следующие выражения для частоты и скорости  $V$  фазовой волны:

$$v = \frac{mc^2 + e\varphi}{\hbar}, \quad V = \frac{mc^2 + e\varphi}{mv},$$

где  $m = m_0 / \sqrt{1-\beta^2}$ . Эти выражения послужили стартовой точкой для Шредингера при работе над волновым уравнением. Простейшим уравнением, которое для плоской волны  $\psi = e^{-i\omega t + ik \cdot r}$  дает согласие с (3), является уравнение

$$-\frac{\hbar}{2m} \Delta \psi + e\varphi \psi - i\hbar \psi = 0.$$

Глава III «Квантовые условия устойчивости траекторий» посвящена рассмотрению квантовых условий Бора для круговых орбит, согласно которым момент импульса электрона является целым кратным числа  $\hbar$ . До этого в модельной теории Бора не существовало теоретического обоснования выдвинутым постулатам, и на движение электронов по классическим законам накладывались искусственно квантовые условия. Де Бройль рассматривает условие квантования орбит Зоммерфельда  $\oint p_i dq_i = n\hbar$ , ( $n$ - целое), где  $p_i$  - импульс и  $q_i$  - соответствующая координата для круговых орбит с произвольным числом степеней свободы, и интеграл по всей области изменения координат. И далее ссылается на работу Эпштейна, в которой дана инвариантная форма условий квантования:  $\int \sum_{i=1}^3 p_i dq_i = nh$ , где интеграл распространен на всю длину траектории. Он пишет, что в этой записи «мы узнаем ин-

теграл действия Мопертюи», т.к. ранее де Бройль уже показал, что  $(1/h) \sum_{i=1} p_i dq^i = (v/V) dl$ . Понятие фазовой волны дает возможность де Бройлю объяснить эти условия.

Траектория движущегося тела является одним из лучей его фазовой волны, и фазовая волна движется вдоль траектории с постоянной частотой и переменной скоростью. Де Бройль делает заключение: для того, чтобы получить стабильную орбиту, длина орбиты должна быть в резонансе с волной  $l = n\lambda$  (если длина волны постоянна) и в общем случае:  $\oint (v/V) dl = n$  ( $n$ - целое число). Взяв интеграл, учитывая, что  $hv = m_0 c^2$ ,  $V = c^2 / v = (c^2 / \omega R)$ ,  $\omega$  - угловая скорость вращения электрона на орбите, де Бройль получил уравнение

$$m_0 \omega R^2 = n\hbar.$$

В этом выводе де Бройля не делается различия между релятивистской массой и классической массой, также как нет различия между внутренней частотой электрона и частотой распространяющейся фазовой волны. Использование выражения  $hv = m_0 c^2$  является, тем не менее, релятивистским. Это противоречие в рассуждениях де Бройля послужило предметом критики МакКиннона [301]. Но в своей первой статье 1923 г. де Бройль дал релятивистский вывод, показав, что правила Бора вытекают из условия малости  $\beta$ . Если соответствующий вывод делать, используя релятивистские уравнения, то, как показано в [249], можно получить

$$m_0 \omega R^2 = n\hbar(1 - \beta^2)^{1/2}.$$

Из этого условия, очевидно, что при малых  $\beta$  также получается правило Бора. Де Бройль не сделал этого шага в диссертации, но ценность применения им фазовых волн к объяснению процесса излучения атома при этом не уменьшилась.

Первый математический вывод де Бройлем таинственного правила квантования Бора отличался от того, что имел место в диссертации. В статье «Волны и кванты» де Бройль вывел правило квантования исходя из предполагаемого эффекта резонанса, когда фазовая волна находится в фазе с внутренними колебаниями электрона. В конце этой статьи де Бройль замечает, что если  $\beta$  принимает большие значения, то решение этого вопроса усложняется, и требует специального решения.

Рассматривая условия квантования Бора и вопрос об излучении абсолютно черного тела, де Бройль привлекает понятие индивидуальной фазовой волны, а не волновой группы. Понятие волнового пакета было ему необходимо лишь для объяснения сверхсветовой скорости фазовой волны. Привлекая это понятие, он показал, что совокупность фазовых волн с близкими частотами перемещается с групп-

повой скоростью, которая равна скорости частицы. И в вопросах применения фазовых волн де Бройль не рассуждает, какая, из дискретного множества стационарных орбит, соответствует резонансу с единственной составляющей длиной волны из волнового пакета. Модель волнового пакета появится позже в работах Шредингера, точный размер пакета и его расплзание со временем станут непреодолимой проблемой.

Де Бройль считал, что объяснение стабильности круговых орбит является важным доказательством правоты его идей, он пишет: «Этот прекрасный результат, являющийся непосредственным следствием идей, высказанных в предыдущей главе, служит наилучшим оправданием нашего способа рассмотрения проблемы квантов» [23, с. 282]. Постулат Бора о существовании стационарных орбит приобретает ясный физический смысл. Де Бройль пишет: «Таким образом, мы видим, почему некоторые орбиты устойчивы, но не знаем еще, каким образом происходит переход от одной устойчивой орбиты к другой. Характер возмущения, сопровождающего этот переход, может быть изучен только с помощью соответствующим образом измененной электромагнитной теории, а такой теорией мы пока не обладаем» [Там же]. На этот результат, полученный де Бройлем, обратил внимание Эйнштейн в своей статье «Квантовая теория одноатомного газа»: «В диссертации имеется также очень интересная геометрическая интерпретация квантовых правил Бора-Зоммерфельда» [207, с. 481].

В статье МакКиннона [301], написанной через пятьдесят лет после защиты диссертации, объяснение де Бройлем условий существования стационарных орбит в атоме с помощью фазовых волн рассматривается как несоответствие между, с одной стороны, релятивистскими фазовыми волнами, которые получены де Бройлем с помощью преобразований Лоренца, а с другой стороны, нерелятивистскими условиями стационарных орбит в атоме Бора. Анализ этого «несоответствия» проведен в работе [269], в которой показано, что применивая предельный переход, когда  $c \rightarrow \infty$ , можно получить характеристики фазовых волн (частота и фазовая скорость), позволяющие записывать условия стационарных круговых орбит в атоме водорода. Автор статьи [269] подчеркивает, что и в нерелятивистском приближении фазовые волны представляют собой неклассическое явление, и никакого противоречия в применении фазовых волн к объяснению стационарных орбит, не существует.

Де Бройль в диссертации показывает, что новая динамика материальной точки представляет точно такую же связь с классической динамикой (к ней он относит и теорию относительности), как геометрическая оптика с волновой оптикой.

В главе IV диссертации де Бройль рассматривает проблему квантования одновременного движения двух электрических центров, в

частности атом водорода. Если два электрических центра взаимодействуют, то понятие изолированной порции энергии, которое изначально использовал де Бройль, становится неопределенным. Если рассматривать протон с собственной массой  $M_0$  и электрон с собственной массой  $m_0$ , то при удалении их друг от друга, когда можно пренебречь их взаимодействием, протон обладает внутренней энергией  $M_0c^2$ , а электрон -  $m_0c^2$ . Полная энергия равна  $(M_0 + m_0)c^2$ . Но, если два центра находятся близко, то возникает вопрос, как учесть вклад их взаимной потенциальной энергии ( $P < 0$ ) в собственную массу протона и электрона. Де Бройль предлагает разделить потенциальную энергию и приписать электрону собственную массу  $m_0 - (\alpha P/c^2)$ , а протону собственную массу  $M_0 - (1 - \alpha)(P/c^2)$ . Он рассуждает о теории атома водорода Бора-Зоммерфельда, в которой всегда считается, что электрон имеет собственную массу  $m_0$ , каково бы ни было его положение в электростатическом поле ядра. И предлагает в спектроскопических измерениях обнаружить вариации постоянной Ридберга, которые связаны с изменениями собственной массы электрона в зависимости от потенциальной энергии.

Де Бройль рассматривает условия квантования для атома водорода с точки зрения задачи двух тел и использует две фазовые волны – одну для электрона и другую для ядра. Лошак пишет: «де Бройль затрагивает наболевший вопрос, которым будет заниматься всю жизнь, – проблему описания системы частиц. Несмотря на все практические решенные проблемы, она по-прежнему остается загадкой для волновой механики, вовравшей в себя все трудности, присущие теории относительности и теории волн» [104, с. 72]. В диссертации де Бройль показывает, что условие Бора можно интерпретировать как выражение резонанса для каждой из рассматриваемых волн. Каждое тело – ядро и электрон, описывает свою траекторию со скоростью, которая в каждый момент касательна к лучу фазовой волны.

Темой главы V являются кванты света. Де Бройль предполагает, что распределение световых волн в пространстве, понимаемое в классическом смысле, является некоторым средним по времени от реального распределения фазовых волн, сопровождающих атомы света. Квант света у де Бройля обладает очень малой собственной массой  $m_0$ , верхний предел ее значения составляет приблизительно  $10^{-44}$  г. При этом скорость кванта света и фазовая скорость сопровождающей его фазовой волны очень близки к скорости света с. При соответствии фазовой волны классической световой волне частота определяется выражением:

$$v = \frac{1}{h} \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Световая волна частоты  $v$  соответствовала бы перемещению светового атома со скоростью  $v = \beta c$ , связанной с  $v$ , уравнением

$$v = \beta c = c \sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{h^2 v^2}}.$$

Исключая случаи высокочастотных колебаний, для которых  $m_0 c^2 / h v$  мало, можно записать  $v = c[1 - (m_0^2 c^4 / 2h^2 v^2)]$ . Далее де Бройль предполагает, что волны, для которых  $1/v = 10^{-4}$  с, имеют скорость, на одну сотую, отличающуюся от скорости  $c$ . В этом случае верхний предел  $m_0$  для светового атома получается

$$m_0 = \frac{\sqrt{2}}{10} \cdot \frac{h v}{c^2} \sim 10^{-44} \text{ г.}$$

Де Бройль пишет, что величина  $m_0$  может быть еще более малой, если измерять в вакууме скорость световых волн еще более низких частот.

По-поводу массы фотона до сих пор существует масса возражений и несогласия с де Бройлем. Но именно благодаря этой гипотезе Луи де Бройль получил единое представление о веществе и свете. Я.А. Смородинский и Т.Б. Романовская пишут: «Правильный результат был получен из двух произвольных, необоснованных гипотез – из гипотезы о массе фотона и из гипотезы о гармонии фаз. Первая гипотеза разделила волновое движение на два, вторая – вернула им единство. В итоге появилась групповая скорость, и волновое движение оказалось присущим не только квантам, но и любым другим частицам. Интуиция оказалась сильнее логики» [144, с. 754]. Сам де Бройль неоднократно приводил свою аргументацию, которую Ж. Лопашак повторяет в книге-биографии де Бройля «Принц в науке»: «Подчеркнем, что никакой физический факт не доказывает, и не опровергает равенство нулю массы фотона, потому что эксперимент не измеряет точно ни одну константу, какой бы она ни была. Он не может доказать ни равенство ее нулю, ни малость массы фотона (в чем никто не сомневается) или, возможно, даже определить приблизительно его массу, если это однажды произойдет» [104, с. 63]. Вопросу о массе фотона посвящена статья И.Ю. Кобзарева и Л.Б. Окуня [74], в которой показано, что аргументы, которые приводят в пользу равенства массы фотона нулю (главный – о нарушении калибровочной инвариантности), неправильны. Авторы приходят к выводу: «теория с нулевой массой фотона с эстетической точки зрения выглядит привлекательней, чем теория с ненулевой массой». Существуют различные экспериментальные методы оценок массы фотона, которые представлены в [297]. Наиболее важные эксперименты по измерению массы фотона приведены ниже в таблице.

Таблица наиболее важных экспериментов  
по измерению массы фотона [297]

Автор	Дата	Ссылка (соответствует [297])	Экспериментальный метод	Верхний предел $m_\gamma$ , (г)
Williams	1971	2	Проверка закона Кулона	$2 \cdot 10^{-47}$
Crandall	1983	15	Проверка закона Кулона	$8 \cdot 10^{-48}$
Chernikov	1992	3	Проверка закона Ампера	$8,4 \cdot 10^{-46}$
Scharfer	1999	16	Измерение скорости света	$4,2 \cdot 10^{-44}$
Fischbach	1994	6	Анализ магнитного поля Земли	$1 \cdot 10^{-48}$
Davis	1975	7	Анализ магнитного поля Юпитера	$8 \cdot 10^{-49}$
Lakes	1998	9	Статические крутильные весы	$2 \cdot 10^{-50}$

Согласно современным экспериментам, проведенным в 2003 г. с помощью вращающихся крутильных весов, граница оценки массы фотона близка к нулю с огромной точностью – меньше чем  $10^{-51}$  г. [297]. В книге Л.Б. Окуня [114] приводится нижняя граница массы фотона  $m_\gamma \leq 10^{-54}$  г.

Де Бройль задается вопросом, как можно представить себе атом света. Имеется существенное отличие в структуре электрона и атома света. «Мы представляем себе квант света обладающим той же симметрией, что и диполь в электромагнитной теории. Это представление является только предварительным, и структуру светового кванта можно будет уточнить надежно только после того, как будет осуществлен более глубокий пересмотр теории электромагнетизма, а эта работа еще не выполнена» [29, с. 290]. Несмотря на трудности при рассмотрении сходства фотона и частиц вещества, синтез, в котором для вещества и света необходимо учитывать одновременно корпускулярный и волновой аспект, является большим достижением. Де Бройль был уверен, что «пытаясь вновь воздвигнуть барьеры между теорией вещества и теорией света, можно впасть в заблуждение» [30, с. 11].

После рассмотрения с помощью световых квантов таких известных волновых явлений как эффект Доплера при движении источника, отражение от движущегося зеркала и давление излучения черного тела, де Бройль обращается к явлениям волновой оптики, и замечает: «Камнем преткновения теории квантов света является объяснение явлений волновой оптики» [23, с. 297]. Де Бройль не уверен в деталях объяснения, почему наблюдаются темные или светлые области в картинах интерференции или дифракции света: «Откровенно говоря, их надо рассматривать скорее как смутные предположения, чем истинные объяснения» [Там же]. Идея заключается в том, что фазовые

волны определяют вероятность для кванта света взаимодействовать с атомами вещества: «локальная вероятность процессов взаимодействия света с веществом связана с суперпозицией (или, скорее, с ее средним значением) векторов, характеризующих фазовую волну. Там, где этот результат суперпозиции нулевой, свет не наблюдается, т.е. имеет место интерференция. Световой атом, пересекающий область интерференции фазовых волн, может быть поглощен атомами материи в одних точках, и не может быть поглощен в других» [Там же, с. 298]. Эти страницы диссертации не содержат формул и расчетов, они целиком состоят из рассуждений и предположений де Бройля. Например, он пишет о том, что электромагнитная теория Максвелла могла бы иметь статистическое толкование, похожее на то, как законы гидродинамики выступают в качестве непрерывного приближения для движения молекул жидкости. В параграфе, который называется «Интерференция и когерентность», де Бройль выдвигает постулат: «Фазовая волна, связанная с движением атома света, может, проходя мимо возбужденных атомов материи, вызвать испускание (эмиссию) других атомов света, фаза которых будет согласована с фазой волны» [Там же]. Этот постулат неявно выражает явление индуцированного излучения в атоме, которое позволяет получить когерентное лазерное излучение.

Ссылаясь на идею соответствия Бора, де Бройль предлагает смелым исследователям искать новую электромагнитную теорию, которая бы находилась в большем согласии, чем существующая, с квантовыми явлениями.

Последняя глава VII диссертации называется «Статистическая механика и кванты». Здесь де Бройль демонстрирует применение новых идей в теории газов и теории излучения абсолютно черного тела. Вместо молекул он рассматривает распространение фазовых волн, находящихся в резонансе с размерами сосуда, в котором заключен газ. Он рассматривает газ, находящийся в равновесии, как систему стационарных фазовых волн. И получает в результате, что распределение фазовых волн в полости будет таким же, как и в теории излучения абсолютно черного тела, использующей понятие электромагнитных волн.

Сначала де Бройль применяет общие рассуждения для газа, состоящего из молекул одинаковой массы  $m_0$ , элемент фазового объема для одной молекулы равен  $dxdydzdpdqdr$ . Число состояний одинаковой вероятности, представленное элементом этого фазового объема, пропорционально его величине. Де Бройль получил распределение Максвелла для числа атомов, содержащихся в единице объема, энергия которых находятся в интервале от  $w$  до  $w+dw$ :

$$dn = \text{const} \cdot e^{-\frac{w}{kT}} 4\pi m_0^{\frac{3}{2}} \sqrt{2w} dw dx dy dz.$$

После «напоминания некоторых результатов статистической термодинамики» де Бройль переходит к «новой концепции статистического равновесия газа». Начинается изложение новой концепции с утверждения: «Если движение атомов газа сопровождается распространением волн, то сосуд, содержащий газ, будет изборожден во всех направлениях этими волнами». Де Бройль вычисляет число стационарных волн, пользуясь ранее полученным результатом Джинса для теплового излучения. Если скорости молекул малы ( $\beta \rightarrow 0$ ), то, рассуждает де Бройль, длина волны ( $V$ - фазовая скорость:  $V = c/\beta = c^2/v$ ) будет определяться скоростью движения молекулы  $v$

$$\lambda = \frac{V}{v} = V \frac{\sqrt{1-\beta^2}}{m_0 c^2 / h} = \frac{c / \beta}{m_0 c^2 / h} = \frac{h}{m_0 v}. \quad (4)$$

Условие резонанса на длине пробега молекулы в этом случае имеет вид:

$$\ell = n\lambda = n \frac{h}{m_0 v}, \quad (n - \text{целое}). \quad (5)$$

Здесь впервые в диссертации появилась запись длины фазовой волны де Бройля в случае нерелятивистского приближения (уравнение (4)), которая вошла во все учебники физики под именем длины волны де Бройля. Уравнение (5) позволяет де Бройлю выразить скорость  $v$  в виде:

$$v = n \frac{h}{m_0 \ell} = nv_0.$$

Изменение целого числа  $n$  соответствует изменению  $\delta v$ :

$$\delta n = \frac{m_0 \ell}{h} \delta v.$$

Воспользовавшись формулой Джинса для вычисления числа волн, содержащихся в единице объема,

$$n_v \delta v = \gamma \frac{4\pi}{UV^2} v^2 \delta v,$$

где коэффициент  $\gamma=1$  для продольных волн,  $\gamma=2$  для поперечных волн,  $U$  – групповая скорость,  $V$  – фазовая скорость волн, и подставляя в нее характерные зависимости для фазовой волны – частоту, фазовую и групповую скорости ( $V = c / \beta$ ,  $U = \beta c$ ), де Бройль получил следующее. Число атомов, содержащихся в элементе объема  $dxdydz$ , кинетическая энергия которых заключена от  $w$  до  $w+dw$ , определяется выражением

$$n_w dw = \text{const} \cdot e^{-\frac{w}{kT}} \int_w^{w+dw} \frac{dxdydzdpdq dr}{h^3}.$$

Таким образом, де Бройль подтверждает гипотезу Планка о том, что фазовый объем молекулы разделяется на ячейки равной вероятности, равной  $h^3$ .

Рассматривая газ из световых атомов, де Бройль получает закон Вина, описывающий излучение черного тела в области коротких длин волн. Чтобы прийти к закону Планка для излучения черного тела де Бройль выдвигает новую гипотезу когерентности: «Если два или несколько атомов имеют фазовые волны, которые точно налагаются друг на друга, так что можно сказать, что они переносятся одной и той же волной, их движения не могут больше рассматриваться, как полностью независимые и эти атомы не смогут больше интерпретироваться как различимые в вычислениях вероятности. Движение этих атомов «в волне» представляло бы некий вид когерентности» [23, с. 316]. Эта гипотеза «ведет нас в хорошую гавань», по выражению де Бройля, «избегая провалов на законах Рэлея и Вина». Роль атома играют стационарные фазовые волны, которые рассматриваются как результат суперпозиции двух волн, распространяющихся в противоположных направлениях.

С помощью гипотезы когерентности он рассматривает флуктуации энергии при излучении абсолютно черного тела. Здесь де Бройль приходит к выводу: «Можно правильно оценить флуктуации излучения абсолютно черного тела, не прибегая никоим образом к волновой теории, но только вводя когерентность атомов, связанных с той же самой фазовой волной» [Там же, с. 320]. Он получает закон Планка о распределении энергии, и выводит формулу флуктуации энергии излучения абсолютно черного тела в форме двух слагаемых. Эта формула впервые была получена Эйнштейном в работе «К современному состоянию проблемы излучения» в 1909 г. [34]:

$$\bar{\varepsilon}^2 = (u_v V dv) h v + \frac{c^3}{8\pi v^2 dv} \frac{(u_v dv V)^2}{V},$$

где  $V$  - полный объем полости,  $u_v$  - плотность энергии. Формула содержит два слагаемых, первое связано с величиной энергии излучения, полученной с помощью независимых квантов  $h v$ , а второе - с волновым объяснением излучения, когда привлекается когерентность волн. Вывод этой формулы де Бройль получил для газа, образованного из «атомов света», используя найденные им ранее свойства фазовых волн. «Можно правильно оценить флуктуации излучения абсолютно черного тела, не прибегая никоим образом к волновой теории, но, только вводя когерентность атомов, связанных с той же самой фазовой волной» - приходит к заключению де Бройль [23, с. 320].

### **3.2.6. Выводы и заключения диссертации де Бройля**

В начале своей диссертации Л. де Бройль сформулировал две цели. Во-первых, осуществить синтез существовавших к тому времени и «кажущихся совершенно различными» точек зрения о природе света. Во-вторых, рассматривая оптику как часть электромагнетизма, где

существует понятие дискретности электричества, осуществить «полный синтез всей физики», т.е. объединить корпускулярные и волновые представления, представления о дискретном и непрерывном во всей физике. В диссертации де Бройль намерен также «несколько углубить понимание истинной сущности кванта».

Для достижения этих целей он вводит ключевые положения:

- 1) с движением любой микрочастицы, в том числе и фотонов, связано распространение фазовой волны;
- 2) скорость распространения фазовых волн  $V$  больше скорости света с  $V = c^2 / \nu$ ,  $\nu$  - скорость частицы;
- 3) групповая скорость фазовых волн, которые образуют пакет, равна скорости частицы  $U = \nu$  и соответствует переносу энергии;
- 4) идентичность принципов Ферма, примененного к фазовой волне, и Мопертюи, примененного к движущейся частице, ведет к установлению основного принципа новой динамики: «возможные динамические траектории движущегося тела идентичны с возможными лучами волны».

Выражение из диссертации де Бройля «кванты, как масляное пятно пропитали собой все области физики» [23, с. 256], стало крылатым. Де Бройль в своей диссертации демонстрирует применение понятия квантов в разных областях: в теории удельной теплоемкости, в статистической теории газов, явлении фотоэффекта, теории атома, явлении рассеяния. Единый подход в рассмотрении столь разных явлений связан с первоначальной гипотезой де Бройля. Каждая порция энергии массы  $m_0$  соответствует периодическому процессу частоты  $\nu_0$ :  $h\nu_0 = m_0c^2$ .

Осознавая фундаментальность поставленной задачи, де Бройль пишет, что, если удастся придать его идеи волн, сопровождающих движение материальных частиц, «совершенно удовлетворительную форму, то она представит собой синтез большой рациональной красоты» [23, с. 323]. Идея де Бройля приобрела определенную форму в диссертации. С помощью гипотезы фазовых волн де Бройль дает физическое объяснение существованию стационарных орбит в теории атома Бора: «это первое физически правдоподобное объяснение условий устойчивости Бора-Зоммерфельда», пишет де Бройль [Там же]. В диссертации предложена «качественная теория интерференции», которую до этого не удавалось объяснить с помощью квантов света. Фазовая волна, введенная в статистическую механику, позволила найти величину элемента фазового объема и получить закон излучения черного тела. В диссертации де Бройль не касается вопросов, связанных с экспериментами по дифракции или интерференции электронов, хотя в более ранней статье «Кванты света. Дифракция и интерференция», он предлагал рассматривать электронную дифракцию

как экспериментальное доказательство существования волн материи. По воспоминаниям самого де Бройля при защите диссертации он получил вопрос от Перрена - можно ли подтвердить выдвинутые идеи экспериментально? На что де Бройль утвердительно ответил – да, рассматривая дифракцию электронов на кристаллах [104, с. 72]. Дифракция электронов на кристалле никеля наблюдалась К. Дэвиссоном и Л. Джермером задолго до теоретических работ де Бройля, но только в 1927 г. эти эксперименты были поняты, после чего последовал ряд экспериментальных работ по изучению дифракции и других элементарных частиц, а также атомов и молекул [305].

Диссертация Луи де Бройля заканчивается следующими словами, подчеркивающими незавершенность его теории на тот момент: «Я намеренно дал довольно нечеткие определения фазовой волны и периодического процесса, которые она, так же как и кванты света, некоторым образом выражает. Настоящую теорию нужно, таким образом, рассматривать скорее как форму, физическое содержание которой не вполне установлено, а не как окончательно разработанную стройную теорию». Сделать следующий шаг в направлении создания теории волновой механики предстояло Э. Шредингеру.

Диссертация демонстрирует характерные черты де Бройля: приверженность физическим моделям и образам, а не математическому формализму, независимость мышления, его исторический подход, в котором отражается понимание связи новых, неклассических принципов, с классическими, использование аналогий. «Его первой заботой был поиск способа описания явлений, удовлетворяющих разум. В его понимании физики имелась определенная структура, и первое место занимало видение мира, а затем следовали приложения» - писал Ж. Лошак [104, с. 72].

В истории квантовой механики значение идей, выдвинутых и обоснованных в диссертации Луи де Бройля, не получило всестороннего анализа. Масштаб и цель диссертации выходят далеко за простое расширение формул  $E = h\nu$ ,  $p = h/\lambda$ , известных для фотонов, на все другие частицы. Тем не менее, диссертация обычно вспоминается исключительно по поводу этой идеи. Отношение к достижениям Л. де Бройля выразил французский историк науки О. Дарригол: «Для того, кто знает только формулу де Бройля  $\lambda = h/p$ , существуют два объяснения его уникальности. Первое - представить его счастливым фантазером, которому неожиданно пришла в голову великая идея в процессе игры с аналогиями и формулами. Второе – представить его глубоким мыслителем, который вывел неожиданные уравнения, привлекая известные и существовавшие до него концепции. Первое объяснение наиболее популярно, хотя не часто выражается в печати. Второе – близко к правде. Каждый, кто читал диссертацию де Бройля, не мог не

восхищаться цельностью и глубиной его представлений, навеянных общими принципами» [264, с. 304].

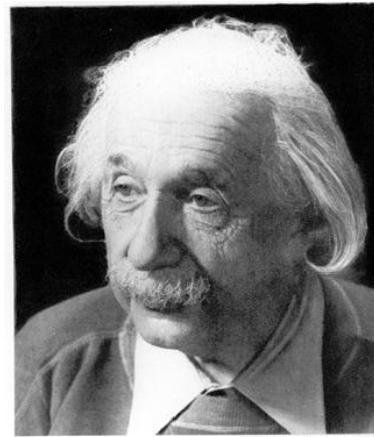
Значение диссертации де Бройля в истории квантовой механики можно понять, если рассмотреть последствия теоретического открытия де Бройлем волнового явления, ассоциированного с электроном и любой другой частицей вещества. С одной стороны, это неопровергимые экспериментальные доказательства существования волн де Бройля, а с другой – обобщение первоначальной идеи до создания формализма квантовой механики. Говоря о значении диссертации де Бройля, М. Борн поставил ее в один ряд с другими великими открытиями в физике, назвав ее «великим синтезом» [291, с. 165]. Почти все великие открытия отражают стремление человеческого разума упрощать и унифицировать физическую картину мира, это стремление лежит в основе принципа синтеза. Начиная с Ньютона, который заметил связь между земной гравитацией и силой, удерживающей планеты на их орbitах, синтез между явлениями, казавшимися не связанными, привел его к общей теории гравитации. В этом же ряду находится синтез электромагнетизма и оптики, который осуществил Maxwell. Следующим шагом на пути развития физики был синтез понятий массы и энергии, осуществленный Эйнштейном в рамках частной теории относительности, а также синтез физической геометрии и гравитации в рамках общей теории относительности. Внешне противоречивые понятия корпускулы и волны получили новое представление в виде корпускулярно-волнового дуализма. Диссертация де Бройля представляла отправную точку для формального синтеза корпускулярных и волновых аспектов физических явлений, после которого всталася проблема понимания корпускулярно-волнового дуализма.

## **ГЛАВА 4. ВОЛНОВАЯ МЕХАНИКА ШРЕДИНГЕРА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ИДЕЙ ДЕ БРОЙЛЯ И ШРЕДИНГЕРА**

### **4.1. О влиянии Л. де Бройля на А. Эйнштейна**

Начиная с 1924 г., в ряде статей Эйнштейна можно увидеть как явные указания на обобщающую работу (диссертацию) де Бройля по теории квантов, так и присутствие общих и одинаково важных для обоих ученых точек зрения. В своем выступлении в ходе дискуссии на Пятом Сольвеевском конгрессе в октябре 1927 г. Эйнштейн извинялся, что не внес существенного вклада в развитие квантовой механики [219, с. 440]. Но, как показывает история квантовой механики, зарождение ее концептуальных основ и методологических приемов было связано с изучением оптических проблем, среди которых важнейшей была проблема природы света. Работы Эйнштейна 1905-1910 гг. по квантовой теории света подготовили почву для восприятия корпуску-

лярно-волнового дуализма света, который приобрел в диссертации Л. де Бройля смысл принципа корпускулярно-волнового дуализма, характерного для всей материи. Кроме этого Эйнштейн заложил основы квантовой теории теплоемкостей вещества, применил к идеальному одноатомному газу статистический метод, что привело к созданию квантовой статистики для систем частиц с симметричными собственными функциями. Большой вклад Эйнштейна в развитие квантовых представлений рассмотрен в обзоре М.А. Ельяшевича [60].



*De Berg-Pic mit herzlichen Grüßen  
Einstein, 51.*  
ALBERT EINSTEIN  
1879-1955

Фотография, подаренная А. Эйнштейном Л. де Бройлю, 1951 г.  
Рукой Эйнштейна сделана подпись: «Де Бройлю с сердечными чувствами.  
А. Эйнштейн, 51»

Историческое введение диссертации де Бройля и статья Эйнштейна «Эксперимент Комптона. Существует ли наука ради самой науки?», опубликованная в апреле 1924 г., демонстрируют почти одинаковый анализ двух точек зрения на природу света, выполненный двумя учеными. Эти точки зрения связаны с корпускулярной (эмиссионной) теорией Ньютона и волновой теорией, основанной на гипотезе Гюйгенса о том, что свет представляет собой упругие волны, распространяющиеся в пространстве (эфире). Эйнштейн пишет, что из работ Планка по тепловому излучению абсолютно черных тел вытекала его собственная гипотеза световых квантов. Квантовая теория света позволяла объяснить ряд явлений, но при этом была не применима к объяснению дифракции света. Вывод, к которому приходит Эйнштейн: «Мы теперь имеем две теории света, обе необходимые и ... существующие без всякой логической взаимосвязи, несмотря на двадцать лет колоссальных усилий физиков-теоретиков» [200, с. 466]. Диссертация де Бройля, в которой эта взаимосвязь указана, Эйнштейну еще неизвестна. Де Бройль закончил диссертацию летом 1924 г., во введении он определил цель: «По-видимому, настал момент попытаться объединить корпускулярные и волновые представления» [23, с. 258].

В сентябре 1924 г. была опубликована статья «Квантовая теория идеального одноатомного газа» [207], в которой Эйнштейн на основе способа подсчета числа молекул, предложенного Ш. Бозе, строит новую квантовую статистику. Фазовое пространство одноатомной молекулы, отнесенное к заданному объему пространства, делится на ячейки объемом  $h^3$ . Вероятность макроскопического состояния определяется числом разных микросостояний, а энтропия макросостояния далее определяется по формуле Больцмана. Эйнштейн показывает, что из новой квантовой статистики можно получить известный классический результат - связь между кинетической энергией  $E$  и давлением  $p$ :  $p = 2\bar{E}/3V$ . Также квантовая статистика позволяет получить теорему Нернста – при абсолютном нуле температуры энтропия обращается в нуль, поскольку при абсолютном нуле все молекулы будут находиться в первой ячейке, а для такого состояния существует лишь единственное распределение.

В конце 1924 г. поступила вторая статья Эйнштейна по квантовой теории одноатомного газа [209], опубликована она была в начале 1925 г., в ней уже есть прямая ссылка на диссертацию де Бройля. Рассматривая работу Эйнштейна [202], написанную в 1909 г., мы отмечали, что в уравнении для флюктуации энергии излучения Эйнштейн получил сумму: первое слагаемое соответствовало частицам, а второе – волнам. Что подтверждало верность и корпускулярного и волнового представлений о свете. Обращаясь вновь в 1924 г. к проблеме флюктуаций применительно к квантовому газу, Эйнштейн получил средний квадрат относительной флюктуации числа молекул

$$\left(\frac{\overline{\Delta_v}}{n_v}\right)^2 = \frac{1}{n_v} + \frac{1}{z_v},$$

где  $n_v$  - среднее число молекул, относящихся к области энергии  $\Delta E$ ,  $n_v + \Delta_v$  - мгновенное значение,  $z_v$  - число ячеек  $v$ -й элементарной области фазового пространства, отметил, что слагаемые в законе флюктуаций поменялись ролями. Первый член, когда-то неизвестный в теории излучения, теперь оказался давно знакомым членом, описывающим флюктуации классического идеального газа в распределении Пуассона для различных частиц. Но как же быть со вторым членом, которым учитывается взаимная неразличимость частиц, в случае газа? Эйнштейн сделал вывод: так как в теории излучения этот член соответствовал волнам, то «ему можно придать соответствующий смысл и в газе, сопоставляя газу некоторый процесс излучения». Это слагаемое, предполагает Эйнштейн, соответствует интерференционным флюктуациям. И далее Эйнштейн пишет: «я рассмотрю это толкование подробнее, т.к. думаю, что здесь речь идет не только о простой аналогии» [209, с. 496]. В поисках ответа на вопрос: Что это за волны? - Эйнштейн обратился к диссертации де Бройля. Он высказал

предположение, что газу должно быть поставлено в соответствие скалярное волновое поле, созданное волнами де Бройля. «Каким образом материальной частице или системе материальных частиц можно сопоставить (скалярное) волновое поле – показал Л. де Бройль в своей работе, заслуживающей всяческого внимания» [Там же]. «Это волновое поле – пока еще неизвестной физической природы – должно оказывать свое влияние на движение» - писал в статье Эйнштейн [209, с. 497]. Как и де Бройль, предсказывающий дифракцию для электронов, Эйнштейн указал, что пучок молекул газа, проходя через отверстие, должен давать дифракционную картину. Но при этом Эйнштейн добавил, что при обычных размерах отверстий наблюдать этот эффект было бы исключительно трудно из-за малости длины волны. Эйнштейн в своей статье приводит результат, полученный в диссертации де Бройля для длины волны

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

С помощью этой формулы Эйнштейн делает оценки длины волны, связанной с движением отдельных молекул, и пишет о возможности наблюдения дифракции при низких температурах для газообразного гелия и водорода, когда длина волны становится того же порядка, что и диаметр молекул.

В следующей работе Эйнштейна «К квантовой теории идеального газа» [206], опубликованной в 1925 г., кратко затрагивается вопрос о том, что в его квантовой теории одноатомного газа световой квант отличается от одноатомной молекулы только своей исчезающе малой массой покоя. Его предыдущие результаты получены на основании аналогии между световыми квантами и молекулами одноатомного идеального газа. Наличие бесконечно малой массы покоя у кванта света предположил Л. де Бройль еще в своей работе 1922 г. [29, с. 184]. Эйнштейн не настаивает на этом допущении де Бройля, он пишет, что «поскольку предположение о такой аналогии никоим образом не одобряется всеми исследователями» [206, с. 503], то он попытается найти другие соображения, касающиеся квантовой теории одноатомного газа.

Статьи Эйнштейна 1924-1925 гг. явились закономерным результатом, завершившим его первоначальную гипотезу о световых квantaх. Эйнштейн писал: «допуская, что излучение может рассматриваться как газ из квантов, мы обязаны признать, что аналогия между газом из квантов и газом из молекул должна быть полной» [209, с. 489]. В статьях Эйнштейна не содержится формулировки принципа дуализма, так же как самого термина дуализм. Основная идея – это существование аналогии между материей и излучением, материальный газ описывается так же, как газ световых квантов. А формула флуктуации энергии излучения, полученная Эйнштейном, в которой

присутствует сложение двух членов, позволила говорить о сложении свойств квантового объекта. Дуализм света стал восприниматься с тех пор как проявление присущих свету и корпускулярных, и волновых свойств.

В 1927 г. в докладе, сделанном в Берлинском университете, Эйнштейн вновь возвращается к анализу природы света и к существующим теориям света. Он приходит к выводу: «Теперь стараются найти синтез обеих теорий, однако пока это сформулировать математически не удалось» [208, с. 526]. Эйнштейн еще раз подчеркивает, что синтез квантовой и волновой теорий пока еще не достигнут, при этом указывает на работы де Бройля и Шредингера, в которых развивается новая волновая механика.

В предисловии к книге де Бройля «Физика и микрофизика», написанном в 1955 г., Эйнштейн отмечал, что де Бройль был первым, кто «осознал тесную физическую и формальную взаимосвязь между квантовыми состояниями материи и явлениями резонанса». Эйнштейн пишет, что наибольшее впечатление на него произвела «искренность изложения борьбы за логическое обоснование основ физики. В конечном счете, именно эта борьба привела де Бройля к твердому утверждению в том, что все элементарные процессы имеют статистическую природу» [211, с. 349]. Если Эйнштейн оставался непримиримым противником статистического истолкования квантовой теории, то де Бройль после 1927 г. полностью присоединился к копенгагенской интерпретации квантовой механики. В своих курсах лекций и книгах де Бройль объяснял происхождение вероятностного представления волновой функции, а также соотношение неопределенностей Гейзенberга.

#### **4.2. О влиянии Л. де Бройля на Э. Шредингера**

Статьи Эйнштейна, в которых он изложил новую квантовую статистику [207, 209], оказали большое влияние, по крайней мере, на двух физиков: Э. Шредингера (1887-1961 гг.), который работал в Цюрихе, и В. Эльзассера (1904-1991 гг.) в Геттингене. В результате Шредингер приступил к поискам волнового уравнения, описывающего состояние электрона в пространстве и времени с точки зрения волн де Бройля. А Эльзассер, имея лишь косвенные доказательства своих экспериментальных исследований по обнаружению электронной дифракции, а также первые экспериментальные попытки Дэвиссона и Кунсмана, опубликовал статью, которая привлекла внимание экспериментаторов к проблеме дифракции электронов, и вскоре были получены первые доказательства наблюдения электронной дифракции. И Шредингер, и Эльзассер смогли сделать свой вклад в развитие волновой механики лишь после глубокого изучения диссертации де Бройля. Схема прямого влияния диссертации де Бройля представле-

на рис. 12. Ниже рассмотрим историю развития экспериментального подтверждения волн де Броиля, в которой важную роль сыграла статья Эльзассера «Комментарии к квантовой механике свободных электронов», написанная под влиянием диссертации де Броиля.



Рис. 12. Схема влияния диссертации де Броиля

Центральное место в истории влияния идей де Броиля, которое в результате привело к ключевым событиям в истории квантовой механики, занимает влияние де Броиля на Шредингера. Эрвин Шредингер был крайне разносторонним человеком и ученым. Сферой его научных интересов являлись вопросы статистической механики, квантовой механики, структуры пространства-времени, общей теории относительности и единых теорий поля. Кроме этого, такие области физики, как радиоактивность и космические лучи, акустика, теория цвета и др. Широта его интересов, выходящая за рамки физики и связанная с философией науки, природой физической мысли, проникновением физики в биологию, нашла отражение в книгах и статьях [183, 303, 324]. Свой сложный путь к установлению волнового уравнения Шредингер описал в 1929 г.: «К современной теории атома я приближался очень медленно. Ее внутренние противоречия звучат как пронзительные диссонансы по сравнению с чистой, неумолимо ясной последовательностью мысли Больцмана... Чтобы путем радикальной перестройки вернуться хотя бы к прежней ясности в теории атома, мной были проверены и отброшены многие свои и чужие исследования. Известное облегчение впервые доставила мне идея де Броиля об электронных волнах, которые я использовал для построения волновой механики» [192, с. 339].

В работах Шредингера 1918-1922 гг. и работах де Броиля 1922-1924 гг. имелось много общего. Ответу на вопрос, почему именно Шредингер развил идеи де Броиля, посвящен ряд исследований [277, 278, 279, 319]. В работе В. Рамана и П. Формана [320] исследован вопрос репутации де Броиля среди представителей научной школы, возглавляемой Н. Бором, а также физиков ряда немецких университетов. В совместных работах 1921-1922 гг. Л. де Броиль и А. Довилье выпол-

няли исследования рентгеновских спектров поглощения. Результаты их исследований оказались несовместимыми с предполагаемым распределением электронов по различным оболочкам  $K$ ,  $L$ ,  $M$ , которое предложили Н. Бор и Д. Костер [10, с. 453-481].

Рентгеновские спектры являются «водородоподобными» в том смысле, что они описываются подобными формулами для линейчатых спектров атома водорода:

$$\nu = \frac{2\pi^2 me^4 Z^2}{h^3} \left( \frac{1}{p^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $Z$  - порядковый номер атома,  $p$ ,  $n$  - целые числа. Если  $p=1$ , то формула дает частоты  $K$ -линии, если  $p=2$ , то  $L$ -линии, и т.д. Более высокая частота рентгеновских спектров объясняется присутствием в формуле множителя  $Z^2$ . Этот множитель объясняет закон Мозли о том, что квадратный корень из частоты любой линии, например,  $K_\alpha$ -линии пропорционален атомному номеру. Таким образом, можно выразить волновое число определенной рентгеновской линии как линейную функцию порядкового номера атома. Эти графические зависимости использовали в своих работах Довилье и Л. де Бройль, например в статье «Полуоптические линии в спектре X-лучей» [237]. В 1921 г. Бор изложил теорию строения атома [10, с. 285-292], связав химические и физические свойства элементов с заполнением электронных оболочек. Боровский принцип распределения электронов в атоме нашел свое подтверждение при установлении неизвестного химического элемента в периодической системе под номером 72. Предыдущий элемент принадлежал к группе редкоземельных элементов, поэтому многие, в том числе и Довилье, считали, что элемент с номером 72 будет принадлежать к этой же группе. Но у редкоземельного элемента с номером 71 оболочка с  $n=4$  достигает полного заполнения, поэтому дополнительный электрон появляется в оболочках  $n=5$  или  $n=6$ . Элемент 72 должен быть гомологичен цирконию (атомный номер 40), это предсказание теории подтвердили Д. Костер и Д. Хэвиши. Новый элемент получил название гафния по латинизированному названию Копенгагена в полном соответствии с взглядами Бора на периодическую систему [119]. Работа Довилье была признана ошибочной. Для де Бройля участие в работе по расшифровке рентгеновских спектров было, по его словам, «первым боевым крещением». «Многие мои рассуждения, развитые тогда, были спорными» - признавал позже де Бройль [14, с. 347]. Из истории, связанной с установлением химической природы гафния, Раман и Форман сделали следующий вывод. Среди европейских физиков, занимавшихся вопросами теоретической спектроскопии, не было желающих тратить свои усилия на то, чтобы понять смысл новых «фантазий» де Бройля о фазовых волнах, ассоциированных с материальными частицами [320, с. 293].



Э. Шредингер в 1933 г.

Шредингер же не принадлежал ни к одной научной школе, не был вовлечен в научные споры вокруг путей, по которым квантовая теория применяется к проблемам атома, и держался в стороне от конфликтов, с этим связанных. Д. Хоффман пишет, что «квантовая теория Бора - Зоммерфельда, хотя Шредингер и посвятил ей несколько интересных работ, в то время еще не играла доминирующей роли в его исследованиях» [183, с. 34]. Шредингера, так же как и де Бройля, можно назвать одиночкой, в том смысле, что такие ученые не нуждаются в коллективных программах и не умеют следовать за лидером. Шредингер писал в автобиографии: «я очень плохо умею работать в коллективе» [192, с. 345]. Его научные интересы были такими же обширными, как у де Бройля, и во многом совпадающими с интересами де Бройля. Они оба признавали реальность световых квантов, необходимость причинного описания явлений, протекающих на атомном уровне, в рамках физического пространства-времени. В диссертации де Бройля Шредингера привлекали следующие ключевые моменты. Во-первых, попытка де Бройля объединить квантовую механику и статистическую механику дала возможность Шредингеру понять работу Эйнштейна «Квантовая теория одноатомного газа» [278]. На основании переписки Эйнштейна и Шредингера можно понять роль квантовой статистики идеального газа, с помощью которой Шредингер развел описание движения электрона в атоме и пришел к созданию новой механики - волновой механики [279]. Работа Шредингера «К Эйнштейновской теории газа» [192, с. 172-182] предшествовала серии работ по волновой механике, и в ней было подчеркнуто фундаментальное значение волновой концепции де Бройля. Использование де Бройлем теории относительности в качестве ключевого момента в описании движения электрона в атоме было близко и понятно Шредингеру. И, самое главное, оптико-механическая аналогия Гамильтона, которая позволила де Бройлю рассмотреть и связать между собой траектории частиц и путь волн, являлась предметом собственных ис-

следований Шредингера. В своих исследованиях аналогии Гамильтона Шредингер, в некотором смысле, опережал де Брайля по времени. Существуют сведения о неопубликованной работе Шредингера «Механика тензорного анализа», выполненной им в период между 1918 г. и 1922 г. [320, с. 303], где он развивал аналитическую механику, опираясь на аналогию Гамильтона. Шредингер писал в автобиографии, что установление им в 1922 г. того факта, что «масштабный множитель Вейля для замкнутых квантованных орбит является целочисленной степенью некоторой универсальной постоянной, которая, возможно, равна единице, представляется важным как предвосхищение, разумеется, бессознательное... теории Л. де Брайля» [192, с. 345].

Эйнштейн был другом и постоянным корреспондентом Шредингера. Всего за период работы Шредингера над волновым уравнением (1925-1926 гг.) они написали друг другу 13 писем [278]. В этих письмах обсуждались работы Шредингера по статистической механике и, в частности, работа 1922 г. «Об одном замечательном свойстве квантовых траекторий электрона» [187]. Переписка Эйнштейна и Шредингера (четыре письма в апреле 1926 г.) позволяет проследить отдельные этапы на пути установления волновой механики де Брайля-Шредингера.

В письме к Эйнштейну от 3 ноября 1925 г. Шредингер объясняет, почему он заинтересовался диссертацией де Брайля. Он пишет, что с «величайшим интересом прочитал несколько дней назад оригинальную диссертацию Луи де Брайля, которую я наконец-то достал... Интерпретация квантовых правил де Брайлем, кажется мне, связана некоторым образом с моей статьей 1922 г., где я показал замечательное свойство калибровочного фактора Вейля  $e^{-\int \phi_i dx_i}$  вдоль каждого квазипериода. Математическая ситуация, как я смог увидеть, такая же, но отличается от моей большим формализмом, меньшей элегантностью и отсутствием общего вида. Действительно, рассмотрение де Брайля и обобщение в рамках его важной теории имеют гораздо большее значение, чем мое единственное утверждение, о котором я не знал, что сделал его первым» (Цитир. по [277, с. 607]).

Л.С. Полак в своих работах [123, 124] анализирует роль теории Германа Вейля в генезисе волновой механики. Он показывает, что для плодотворной работы Шредингера в области волновой механики постоянный контакт с этим математиком и многогранным ученым, который оказывал ему непосредственную помощь в разработке методов решения, давал рекомендации специальной литературы, имел исключительное значение. Связь единых теорий поля и квантовой механики рассмотрена Вл.П. Визгинным [41]. Он приходит к выводу, что центральной проблемой, решение которой привело Шредингера к волновой механике, была проблема волновой переформулировки кванто-

вых условий для атома водорода. Визгин пишет, что статья Шредингера 1922 г. «была своеобразным мостом, соединяющим резонансную интерпретацию квантовых условий де Бройля с подходом Шредингера» [41, с. 91].

Формально вывод, к которому пришел Шредингер в 1922 г., имеет много общего с установленным де Бройлем в 1923 г. объяснением квантовых условий Бора-Зоммерфельда при помощи фазовых волн. Шредингер писал: «Если бы электрон на своей орбите был связан с некоторым «отрезком» («масштабом»), который оставался бы при движении неизменным, то при отсчете от некоторой произвольной точки орбиты мера этого отрезка казалась бы всегда кратной некоторой почти целочисленной степени экспоненты  $e^{h/\gamma}$  всякий раз, когда электрон возвращается в исходное положение» [192, с. 170].

Статья Шредингера 1922 г. не оказала какого-либо заметного влияния на его работы, опубликованные в 1926 г. по волновой механике (на нее нет ссылок ни в одной из шести статей по волновой механике). Так же, как и не повлияла на Л. де Бройля, в его статьях в период с 1923-1927 гг., а также в последующих воспоминаниях, об этом нет никаких сведений. На историческое значение статьи 1922 г. впервые указал Ф. Лондон, который написал восторженное письмо Шредингеру. Текст этого письма на немецком языке приводится в [320, с. 304], и в нем есть слова: «Вы держали в руках резонансный характер квантового постулата задолго до де Бройля». Выдержку из письма Лондона привел и Визгин: «...Вы показали, что на действительных дискретных траекториях калибровка (при  $\gamma = 2\pi i/h$ ) воспроизводится после каждого оборота и при этом, как Вы заметили, единица длины на  $n$ -й траектории  $n$  раз возрастает и уменьшается в точности, как в случае стоячей волны, которая описывает распределение заряда в атоме» [41, с. 89]. С такой оценкой Лондона Шредингер в дальнейшем согласился и позднее указывал на эту свою статью в автобиографии, а также обсуждал ее в переписке с Эйнштейном. Но эта статья в значительной степени говорит не о предвосхищении работы де Бройля, а о том, что у де Бройля и Шредингера было много общего в подходе к решению пространственно-временного описания явлений микромира. Идея де Бройля о резонансном характере распространения фазовых волн в атоме была близка Шредингеру, и, если в 1922 г. он зашел в тупик, то после диссертации де Бройля смог в очень короткие сроки создать модель одноэлектронного атома.

В ноябре 1926 г. шла интенсивная работа Шредингера над диссертацией де Бройля, он готовился выступить на коллоквиуме с разъяснениями основных идей де Бройля, пытался найти структуру распространяющихся электронных волн. В письме к профессору из Тюбенгена А. Ланде от 16 ноября 1925 г. Шредингер пишет: «Я интен-

сивно работал эти дни над гениальной (*ingenious*) диссертацией Луи де Бройля. Она чрезвычайно захватывающая, но я все еще имею некоторые серьезные затруднения. Я тщетно пытаюсь создать для себя картину фазовой волны электрона на эллиптической орбите» [303, с. 140]. Диссертацию де Бройля Шредингер доложил на коллоквиуме 7 декабря 1925 г. в Цюрихском университете и получил вполне естественное замечание о том, что распространяющиеся волны должны иметь волновое уравнение. Шредингер приступил к поиску уравнения, описывающего поведение волн де Бройля в силовом поле. В очень короткие сроки к середине 1926 г. вслед за матричной механикой Гейзенберга была создана волновая механика Шредингера - де Бройля.

В письме Шредингера к Эйнштейну от 23 апреля 1926 г. содержатся два признания. Во-первых, о том, что диссертация де Бройля помогла Шредингеру прояснить для себя процедуру подсчета молекул идеального газа, продемонстрированную Эйнштейном во втором сообщении [209]. Во-вторых, о том, что объяснение де Бройлем условий квантования Бора-Зоммерфельда имеет много общего с его собственной попыткой, сделанной в 1922 г. Статья Шредингера «К Эйнштейновской теории газа» поступила в редакцию 15 декабря 1925 г., и в ней рассмотрено обоснование теории газов Эйнштейна с помощью собственных колебаний, которые получаются посредством квантирования стоячих фазовых волн де Бройля, заполняющих некоторый объем. Шредингер показывает, что «значение Эйнштейновской теории газа заключается в том, что газ можно понимать как систему собственных линейных колебаний» [192, с. 182]. И в отношении статистики, предложенной Бозе, еще не разработанной до конца в случае газа, Шредингер предлагает применять ее к объектам, которые представляют собой совокупность не индивидуумов, а возбужденных состояний энергии. Его метод состоял в том, чтобы рассматривать частицу как сигнал в системе волн, частота которых, как показал де Бройль, определяется уравнением  $v = (m_0 c^2 / h)(1 - \beta^2)^{-1/2}$ . Вместо того, чтобы рассматривать число молекул с разными значениями энергии, Шредингер предлагает рассматривать газ как набор гармонических осцилляторов. Найти спектр этого набора означало найти число собственных колебаний. В конце статьи Шредингер кратко рассматривает возможность представления частицы как результата интерференции волн. Рассматривая представление частицы как локализованного во времени и в пространстве волнового пакета, Шредингер приходит к выводу, что при наличии дисперсии волновые пакеты, содержащие волны из определенного интервала частот, не будут сохраняться во времени. Поэтому такая модель представления частиц в виде волновых пакетов представляет собой неразрешимую проблему.

Вслед за этой статьей 27 января 1926 г. была получена новая статья Шредингера «Квантование как задача о собственных значени-

ях», в которой развивается идея собственных колебаний. Шредингер пишет: «В этом сообщении я собираюсь показать на простейшем примере нерелятивистского свободного атома водорода, что обычные правила квантования могут быть заменены другими положениями» [191, с. 9]. Шредингер формулирует и решает вариационную задачу на нахождение спектра значений энергии  $E$  в одноэлектронном атоме. Уравнение, которое он решает,

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left( E + \frac{e^2}{r} \right) \psi = 0$$

дает возможность рассматривать стационарные электронные орбиты в теории Бора-Зоммерфельда как собственные колебания атома. «То, что при переходе энергии от одного собственного колебания к другому появляется нечто с частотой, равной разности частот собственных колебаний, достаточно понятно; нужно лишь предположить, что световая волна причинно связана с биениями», - пишет в заключении Шредингер [Там же, с. 19]. Для него представление, когда при квантовом переходе энергия преобразуется из одной колебательной формы в другую, более удовлетворительно, чем представление о «перескакивающем электроне». Как отмечают авторы книги «Методология обоснования квантовой теории», работы Шредингера имели самое непосредственное отношение к поиску оснований квантовой теории. Они пишут: «Как и создатели матричной механики, Шредингер стремился избавить квантовую физику от произвольности, искусственности и непоследовательности» [3, с. 202].

Шредингер использует представления де Бройля о фазовой волне, сопровождающей движение электрона в атоме. Он пишет, что «основным исходным толчком, который привел к появлению приведенных здесь рассуждений, была диссертация де Бройля, содержащая много глубоких идей, а также размышлений о пространственном распределении «фазовых волн» [191, с. 18]. И подчеркивает, что «главное отличие от теории де Бройля, в которой говорится о прямо-линейно распространяющейся волне, заключается здесь в том, что мы рассматриваем, если использовать волновую трактовку, стоячие собственные колебания» [Там же].

Нельзя не согласиться с выводом, который сделал Мартин Клейн [69] о роли Эйнштейна, особенно его работы по газовой теории, которая явилась связующим звеном между теорией волн материи де Бройля и волновой механикой Шредингера. Статья Шредингера «К Эйнштейновской теории газа» логически предшествовала серии дальнейших работ о «Квантовании как проблеме на собственные значения» и, которая, как считает Клейн, должна была бы составить предисловие к этой серии. О роли, которую сыграли Эйнштейн и де Бройль в создании волновой механики, со слов самого Шредингера,

можно прочитать в письме к Эйнштейну от 23 апреля 1926 г.: «Ваше и Планка одобрение больше значит для меня, чем одобрение полсвета. Впрочем, это дело не возникло бы ни теперь, ни когда-либо позже (я имею в виду свое участие), если бы Вы в Вашей второй статье о квантовой теории газов не щелкнули меня по носу, указав на важность идей де Бройля» [192, с. 331].

Во втором сообщении, опубликованном в феврале 1926 г., Шредингер воплотил точку зрения де Бройля о том, что новая механика относится к классической механике как волновая оптика к геометрической. Шредингер обратил внимание на полную аналогию между классической механикой и геометрической оптикой, которая выражалась в идентичности дифференциальных уравнений классической механики и геометрической оптики. Дифференциальное уравнение классической механики, описывающее корпускулярные свойства излучения, – это уравнение Гамильтона-Якоби:

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z}\right)^2 = \frac{w^2}{u^2}.$$

Волновые свойства излучения описываются волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{w^2}{u^2} \psi = 0.$$

Шредингер задался вопросом: «Может быть, неприменимость обычной механики к микромеханическим проблемам оказывается такого же рода, как и неприменимость геометрической оптики к явлениям дифракции и интерференции, и не окажется ли возможным преодолеть ее подобным же образом?» [190, с. 182]. Вопрос, который ставил де Бройль – не является ли классическая механика приближением, пригодным, подобно геометрической оптике, лишь в известных пределах? Неоднократно в трех статьях, предшествовавших диссертации, де Бройль говорит о построении новой динамики, которая относится с прежней так же, как волновая оптика с геометрической [29, с. 197, с. 200, с. 201]. Направление, в котором надо искать новую динамику световых квантов, впервые указал де Бройль. В этом же направлении, в каком совершается переход от геометрической оптики к волновой. Румер пишет, что именно Шредингеру «суждено было полностью выявить глубокий физический смысл оптико-механической аналогии» [136, с. 60]. Если де Бройлю аналогия принципов механики и геометрической оптики дала ключ к пониманию и установлению симметрии между механическим движением и распространением волн, то Шредингер обобщил аналогию Гамильтона, записав дифференциальное уравнение для волн вещества.

В оптико-механической аналогии сопоставляются уравнения эйконала и Гамильтона-Якоби:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 = \frac{\omega^2}{u^2} \iff \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)^2 = 2m(E - U).$$

Уравнение эйконала – лишь приближение оптических явлений, подчиняющихся более общему волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{u^2} \psi = 0 \iff \dots$$

Уравнение для волновой механики (отмеченное звездочками), соответствующее этому волновому уравнению оптики, написал Шредингер.

Записав фазовую волну де Броиля в виде  $\psi = \psi(x, t)$ , Шредингер взял обычное волновое уравнение

$$\nabla^2 \psi = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2},$$

где  $V$  – фазовая скорость волны. Таким образом, Шредингер указывает, что функция  $\Psi$  естественным образом связана с неким колебательным процессом в атоме. Вместо конкретного представления об этом волновом процессе он избирает путь чисто математического описания. При условии временной зависимости волны  $\sim e^{-2\pi i v t}$  Шредингер записал стационарное уравнение:

$$\nabla^2 \psi = -\frac{4\pi^2 v^2}{V^2} \psi.$$

Уравнение Шредингера является линейным дифференциальным уравнением типа уравнений, описывающих стационарные процессы в колебательных процессах. У Шредингера волны не связаны с частицами, а заменяют их. В одной из первых своих статей он пытался представить частицу как волновой пакет, т.е. как группу волн, занимающих определенную часть пространства, и движущийся целиком. Так как электрон интерпретируется как протяженная частица, то волновой пакет должен обладать конечными размерами, но это невозможно, из-за дисперсии волновой пакет не сохраняет постоянных размеров.

Шредингер выслал де Броилю в самом начале 1926 г. препринт своей первой статьи, реакция де Броиля была восторженной [14, с. 351]. Де Броиль написал заметку «Замечания о новой волновой механике» по поводу уравнения Шредингера, изложив в ней с применением метода Шредингера релятивистскую форму волнового уравнения. Де Броиль выразил несогласие с представлением в теории только волн и исключением частицы из рассмотрения. Де Броиль писал, что был удивлен, когда узнал, что для описания движения системы частиц надо вводить «явно фиктивное распространение волн в абстрактном конфигурационном пространстве» [14, с. 352].

Хоффман пишет, что непреходящее значение уравнения Шредингера состоит не только в новом подходе к описанию микромира, но

и в том, что «выражая законы квантовой механики в «привычной» форме дифференциального уравнения, оно показало пример творческого подхода к созданию математического аппарата квантовой механики» [183, с. 44]. То, что в своих вычислениях Шредингер обошелся без трансцендентной алгебры, используемой в матричной механике, давало надежды ряду физиков, в том числе самому Шредингеру, что квантовая механика сможет получить классически наглядное истолкование. Для Шредингера авторитет классической концепции движения был непререкаем, поэтому он пытался трактовать волновую функцию наглядным образом и поэтому говорил о колебательном движении в пространстве и времени. Шредингер высказал гипотезу электромагнитной природы волновой функции, он интерпретировал ее как непрерывное распределение электричества в реальном пространстве [192, с. 73]. «Стремление к наглядности уводило Шредингера в сторону от столбовой дороги поиска оснований квантовой физики» - считают авторы [3]. Рассматривая процессы рассеяния электронов и альфа-частиц на ядрах, М. Борн в 1926 г. предложил трактовку волновой функции, с которой Шредингер не согласился. Ссылаясь на применение Эйнштейном понятия «поля-призрака», которое указывает путь корпускулярным квантам света, Борн писал: «Напрашивается мысль считать волны де Бройля-Шредингера тем самым «полем-призраком», или, лучше сказать, «ведущим полем» [11, с. 633]. Борн предложил связать с волновой функцией Шредингера представление о некоей «призрачной волне», определяющей квантовое поведение в статистическом смысле: квадрат ее амплитуды соответствует плотности вероятности в конфигурационном пространстве [11, с. 634]. Это означало, что волновая функция не дает описания отдельного события, а позволяет определить лишь его вероятность, событие является элементом некоторого статистического ансамбля. В своей статье «Значение волновой механики», написанной в 1952 г. в юбилейный сборник, посвященный де Бройлю, Шредингер писал: «Так же как и я, де Бройль испытал потрясение и разочарование, когда узнал, что абстрактная, едва ли физическая интерпретация волновых явлений, продвигается вперед, приветствуется почти всеми ведущими физиками-теоретиками как единственная возможная в согласии с экспериментами, и которая сейчас является ортодоксальной» [291, с. 17].

#### **4.3. Экспериментальное подтверждение волн де Бройля**

Диссертация де Бройля оказала влияние не только на развитие теоретических работ Эйнштейна и Шредингера, но и на работы ряда экспериментаторов – К.Дж. Дэвиссона, Дж.П. Томсона, В. Эльзассера. Идея де Бройля о существовании фазовых волн, связанных с движением частиц, была настолько фантастической, что экспериментаторы не могли не сделать попыток доказать существование этих волн. В

1927 г. в докладе на заседании Франклиновского института Дэвиссон на свой вопрос - Волны ли электроны? ставил встречный вопрос – Волны ли рентгеновские лучи? Если они волны, то и электроны тоже волны, в этом был уверен Дэвиссон [58, с. 483]. «Фазовые волны, связанные, например, с электроном, настолько же реальны, насколько реальны обычные световые волны, связанные с квантами света, наблюдаемыми при всех явлениях поглощения или другого действия света», - писал один из первых отечественных исследователей дифракции электронов П.С. Тартаковский [163, с. 340].

Естественно, что первые попытки прямого наблюдения электронных волн были сделаны в лаборатории М. де Бройля, где зародилась идея фазовых волн Л. де Бройля. В письме 17 сентября 1973 г. де Бройль писал о том, что он предложил А. Довилье выполнить эксперимент по обнаружению дифракционных или интерференционных явлений с электронами. Но Довилье был занят другой работой и не откликнулся на предложение [305, с. 40]. В юбилейной статье к 60-летию Л. де Бройля А. Довилье, ставший известным астрофизиком, писал: «Первые эксперименты по обнаружению этих свойств электронов дали отрицательный результат. Катодные лучи (пучки электронов), используемые в этом эксперименте, были слишком мягкими, и кристалл облученной слюды принял на себя паразитные электрические заряды в высоком вакууме» [291, с. 171]. Таким образом, эксперименты Довилье были первыми прямыми попытками обнаружить волновые свойства электрона. По его собственному признанию, он мало доверял в 1924 г. идею де Бройля о существовании волн материи и поэтому не проявил настойчивость в совершенствовании эксперимента. Довилье перечислил имена окружавших де Бройля физиков – М. де Бройля, П. Ланжевена, Ж. Перрена, которые в своих лабораториях обладали необходимыми приборами, опытным персоналом и могли бы выполнить подобные эксперименты по дифракции электронов, но почти никто не верил в их реальность.

В истории открытия дифракции электронов важную роль сыграл двадцатидолголетний студент, изучающий физику под руководством Д. Франка в Геттингенском университете, В. Эльзассер. Его интересовала статистика Бозе-Эйнштейна, он изучил диссертацию де Бройля и хорошо знал работы К.Дж. Дэвиссона и его ассистента К.Г. Кунсмана в лаборатории «Bell-Telephone» по изучению отражения медленных электронов от металлических поверхностей. Они надеялись этим способом понять конфигурацию электрического поля, окружающего отдельные атомы, и обнаружить в них электронные оболочки. Дэвиссон и Кунсман обнаружили максимумы и минимумы в энергии отраженных электронов в зависимости от угла отражения и сделали вывод, что медленные электроны отражаются по-разному, когда встречаются с

различными оболочками атомов. Они даже предположили, что электроны могут быть своего рода зондом для исследования внутреннего строения атомов [259, 260]. Дэвиссон в своей Нобелевской лекции «Открытие электронных волн» в 1937 г. писал, что начало исследований по дифракции электронов надо отнести к 1919 г. Тогда он с Кунсманом обнаружил, что «верхний предел энергетического спектра при вторичной электронной эмиссии совпадает с энергией первичных электронов, даже если они ускорены до сотен вольт. Это было объяснено упругим рассеянием электронов в металле. С этого началось изучение углового распределения электронов, испытавших упругое рассеяние» (цит. по [109, с. 143]).

Франк предложил Эльзассеру изучить вопрос о том, можно ли каким-то образом объяснить максимумы, полученные Дэвиссоном, с помощью волн де Броиля. Эльзассер показал, что их можно интерпретировать как эффект, вызванный интерференцией волн. Наблюдались резкие пики, которые при увеличении скорости электронов приближались к положению тех максимумов, какие существовали бы в картине дифракции света с длиной волны де Броиля на плоской решетке с периодом, характерным для кристаллов платины [270].



В. Эльзассер

Эльзассер был также знаком с работой К. Рамзауэра, в которой показано, что инертный газ прозрачен для электронов с определенными низкими энергиями [163, с. 341]. Такие электроны называются медленными. В экспериментальных установках электроны классифицируются по их скоростям, которые определяются ускоряющим напряжением  $(1/2)mv^2 = eU$ . Следовательно, длина волны электрона в нерелятивистском приближении равна  $\lambda = h/\sqrt{2meU}$ . Если выражать  $U$  в вольтах, а  $\lambda$  в ангстремах, то  $\lambda = \sqrt{150/U} = 12,25/\sqrt{U}$ . Медленные электроны со скоростями в несколько десятков Вольт имеют длину фазовой волны в несколько Ангстрем, а для электронов со скоростями в десятки тысяч Вольт – фазовые волны эквивалентны самым жестким

рентгеновским волнам. Впервые Рамзауэр исследовал поперечное сечение упругого рассеяния электронов на атомах аргона при энергиях электронов от долей электронвольта до нескольких десятков. Сечение упругого рассеяния имеет размерность площади, т.е. представляет собой площадь мишени вокруг атома, попадая в которую, электрон испытывает упругое рассеяние. Объяснить результаты, полученные Рамзауэром, можно, лишь привлекая волны де Броиля. Если энергия электрона такова, что его длина волны сравнима с диаметром атома, то в результате дифракции электрона на атоме возникает пятно Пуассона (для видимого света известно, что при дифракции на непрозрачном диске в центре геометрической тени существует яркое пятно - пятно Пуассона). Этот же эффект следует ожидать и для де бройлевской волны электрона. Это означает, что электроны проходят через атом аргона, не испытывая какого-либо отклонения.

Эльзассер после знакомства с диссертацией де Броиля предположил, что известные ему эксперименты Дэвиссона, а также Рамзауэра могут служить подтверждением волновой природы электронов. Вывод был сделан на основании качественного сравнения кривых, полученных Рамзауэром, и кривых рассеяния света коллоидными частицами, которое являлось чисто дифракционным. Об этом Эльзассер написал в небольшой заметке [270], которую приняли в печать благодаря положительному отзыву на нее Эйнштейна. В 1926 г. в своей статье «Квантовая механика процессов столкновения» М. Борн ссылается на эту статью Эльзассера. Он пишет, что Эльзассер пришел к выводу: «медленные электроны должны отклоняться атомами таким образом, что их распределение после столкновения приблизительно соответствует распределению интенсивности света, претерпевшего дифракцию на шаре малых размеров. Он тем самым связал результаты опытов Рамзауэра по наблюдению свободного пробега электронов и экспериментов Дэвиссона и Кунсмана по угловому распределению электронов, отраженных от платиновой пластинки» [11, с. 650].

В работе [263, с. 43] приводятся слова Л. де Броиля о том, что он, конечно, знал работы Рамзауэра и Эльзассера, написанные в 1924-1925 гг., но не рассматривал их как ясное подтверждение своих идей. Эльзассер впоследствии старался выполнить обещанный в своей статье эксперимент по наблюдению дифракции электронов, обращаясь за помощью к Франку как к более опытному экспериментатору, но, не получив поддержки, вскоре отказался от своей идеи, отошел от экспериментальной работы и переключился на другие вопросы теоретической физики. В течение короткого периода (1933-1936 гг.) Эльзассер работал в Институте Анри Пуанкаре в Парижском университете, созданном в 1928 г. для исследований в области теоретической физики [291].

В экспериментах Дэвиссона и Кунсмана по исследованию рассеяния электронов металлами существенным условием успеха считалось достижение высокого вакуума и тщательное обезгаживание всех металлических частей прибора. По оценкам Дэвиссона, вакуум, который создавался в его установке, был порядка  $10^{-8}$  мм. Столь высокое значение вакуума было необходимо, чтобы значения скоростей электронов, которые рассеиваются, мало отличались от начальных скоростей. Многие ученые делали похожие попытки наблюдения рассеяния электронов, но отказались от продолжения, т.к. столкнулись с трудностями получения необходимого высокого вакуума и детектирования слабо интенсивных пучков электронов.

Случай заставил в 1925 г. Дэвиссона и его нового молодого коллегу по экспериментам Л.Х. Джермера пойти иным путем. Во время работы произошел взрыв и трубка, в которой находилась мишень для электронов, треснула и окислилась. Для восстановления образца из никеля его долго прокаливали в вакууме. Когда эксперименты возобновились, то обнаружили, что угловое распределение рассеиваемых электронов полностью изменилось, появились отчетливые максимумы и минимумы [261]. Дело в том, что после отжига на поверхности металла образуются довольно крупные кристаллы. В своей статье Дэвиссон и Джермер впервые предположили, что «электроны прокладывали себе путь между плоскостями кристаллической решетки» [262]. Их эксперименты позволяли строить зависимости углов, в которых наблюдались максимумы, от скоростей электронов. На рис. 13 приведены полярные диаграммы рассеяния электронов с энергией 75 эВ до отжига металлической пластиинки (А), они содержатся в статье Дэвиссона и Кунсмана 1921 г., и после - (Б), эти нижние диаграммы получены Дэвиссоном и Джермером в 1925 г. Две нижние диаграммы показывают, что число максимумов электронной интенсивности увеличилось, а сами максимумы стали резче по сравнению с наблюдениями рассеяния от поверхности, не подвергнутой отжигу.

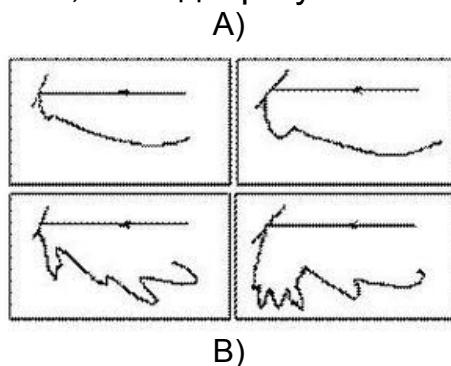


Рис. 13. Кривые рассеяния электронов кристаллом Ni [262]

В 1926 г. Дэвиссон посетил Англию и участвовал в работе конференции в Оксфорде, созванной Британской ассоциацией развития

науки, где встречался и обсуждал свои результаты с М. Борном, Д. Хартри, там присутствовал и Д. Франк [276]. Два года спустя в 1928 г. на такой же конференции в Глазго состоялась встреча Л. де Бройля с учеными, экспериментально подтвердившими открытые им волны материи. На встрече 1926 г. М. Борн назвал кривые, полученные Дэвиссоном, подтверждением существования электронных волн де Бройля [276]. После возвращения в США Дэвиссон приступил к изучению статей Шредингера по волновой механике, пытаясь найти объяснение наблюдавшихся им явлений. Была составлена программа детального исследования, и в начале 1927 г. Дэвиссон вместе с Джэрмером получили интенсивные пучки электронов, обусловленные линейной упорядоченностью поверхностных атомов. Дэвиссон отмечал в нобелевской лекции, что Эльзассер первым обратил внимание на наблюдение дифракции электронных волн. Хотя опыты в Нью-Йорке были начаты еще до получения статьи Эльзассера, в самом начале они не были связаны с проверкой идеи волновой механики о существовании волн материи. «Для истинной истории этого открытия характерен недостаток проницаемости и избыток терпения» - писал Дэвиссон (цит. по [109, с. 143]).

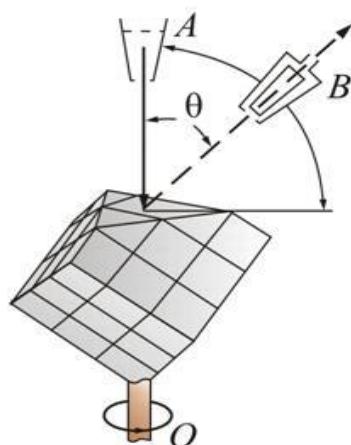


Рис. 14. Схема опытов К.Дж. Дэвиссона и Л.Х. Джермера

Дэвиссон и Джермер усовершенствовали аппаратуру и методику и произвели тщательное систематическое исследование, приведшее к окончательному доказательству дифракции электронов. На рис. 14 представлена схема опытов. Узкий пучок моноэнергетических электронов (на рис. 14 А обозначает «электронную пушку») направлялся на поверхность монокристалла никеля, сошлифованную перпендикулярно к большой диагонали кристаллической ячейки. Отраженные электроны улавливались цилиндрическим электродом В, при этом интенсивность отраженного пучка оценивалась по силе тока, протекающего через гальванометр. Динамика дифракционного отражения электронов при изменении ускоряющего напряжения показана на рис. 15.

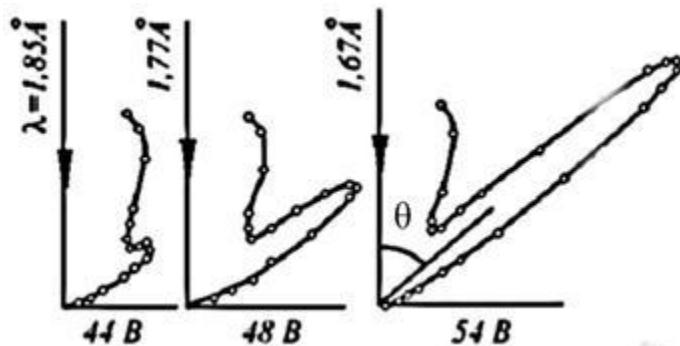


Рис. 15. Полярная диаграмма, изображающая интенсивность упругого рассеяния при разных ускоряющих напряжениях [262]

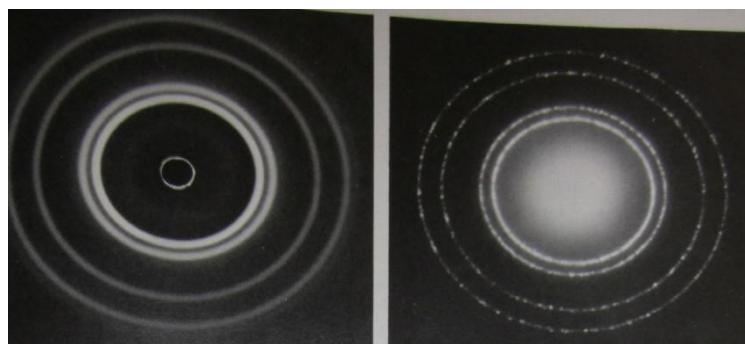
Пучок медленных электронов, отраженных от поверхности мишени, вырезанной из монокристалла никеля, дает четко выраженную анизотропию рассеянных электронов в различных направлениях относительно мишени. Для  $\lambda=1,67 \text{ \AA}$  максимум наиболее выражен. Поверхность кристалла, на которой происходило рассеяние электронов, можно рассматривать как совокупность нескольких плоских дифракционных решеток. Если условие наблюдения дифракционных максимумов выразить уравнением  $n\lambda = d\sin\theta$ , то критерием того, что пучок отразился от плоской решетки, будет условие:  $\sqrt{U}\sin\theta = \text{const}$ , т.к.  $\lambda \sim 1/\sqrt{U}$ . Экспериментальные зависимости  $\lambda$  от  $\sin\theta$  хорошо аппроксимировались прямыми. Исследования Дэвиссона являлись электронной аналогией рентгенограмм Лауз.



К.Дж. Дэвиссон и Л.Х.Джермер, 1926 г. [305]

Если рассматривать электронные пучки с различными скоростями как распространение фазовых волн, то можно установить аналогию между явлениями, связанными с электронами, и дифракционными явлениями рентгеновских лучей, имеющими те же длины волн, что и фазовые волны. При отражении рентгеновских лучей от монокристалла получается дифракционная картина, соответствующая рентгено-

граммме Лауэ: ряд концентрических колец, расположенных определенным образом. Примерно такую же картину можно было ожидать и при рассеянии электронов монокристаллом. На рис. 16 представлены две фотографии, слева - дифракция рентгеновских лучей с длиной волны 7,1 нм на кристалле алюминия, а справа – электронная дифракция, полученная на кристалле алюминия с помощью электронов с энергией 600 эВ (длина волны порядка 5 нм) [225, с. 53]. Два вида дифракции для одного и того же материала, физическое объяснение которых различно, дают трудно различимые внешние проявления на фотографиях.



*Рис. 16. Картины дифракции на кристалле Al: рентгеновские лучи (слева) и электроны (справа) [225, с. 53]*

Дж.П. Томсон после прочтения статьи де Бройля в «Philosophical Magazine» в 1924 г. написал небольшую заметку, посвященную дальнейшему развитию идеи де Бройля. Она не имела большого значения, но показывала, что Томсон был хорошо подготовлен к восприятию идей, изложенных де Бройлем в диссертации. Томсон также участвовал в конференции в Оксфорде в 1926 г., где шло обсуждение теории де Бройля и явлений дифракции. В отличие от Дэвиссона, Томсон работал с очень быстрыми электронами (в его установке использовались электроны от 17500 В до 56500 В). Длина волны рассчитывалась в соответствии с релятивистской формулой  $\lambda = (h\sqrt{1 - v^2/c^2})/m_0v$ , и электронам в 25000 В соответствовала длина волны  $\lambda = 0,075 \text{ \AA}$ . В этом случае можно было работать не на отражение электронов, а на их прохождение сквозь тонкие целлULOидные пленки толщиной примерно  $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ , в результате Томсон и А. Рейд (A. Reid) обнаружили дифракционные кольца [165, 325]. Позже они исследовали такие металлы, как золото, алюминий, платина. Из размера колец на дифракционной картине можно было сделать вывод о длине волн, и во всех случаях Томсон получил значение  $\lambda = h/p$ . Если поток электронов был направлен на экран с двумя щелями, то интерференционная картина имела такой же вид, как и в случае света. Независимо от Томсона эксперименты по прохождению электронного пучка через металлическую фольгу вел П.С. Тартаковский [163]. В 1926-1927 гг. в Ленинградском

Физтехе молодой сотрудник Тартаковский самостоятельно без соавторов ставил опыты по наблюдению дифракции медленных электронов с энергиями до 1700 эВ на поликристаллах никеля и алюминия. Результаты экспериментов, в которых Тартаковский наблюдал рассеяние электронов при прохождении тонкой металлической фольги, были опубликованы в 1928 г. Тартаковский ссылается на статью Томсона и дает подробное описание экспериментов по дифракции электронов [163]. В 1932 г. была опубликована книга Тартаковского «Экспериментальные основания волновой теории материи» [164], в это время он уже являлся профессором Томского государственного университета и возглавлял кафедру теоретической физики.



П.С. Тарта́ковский

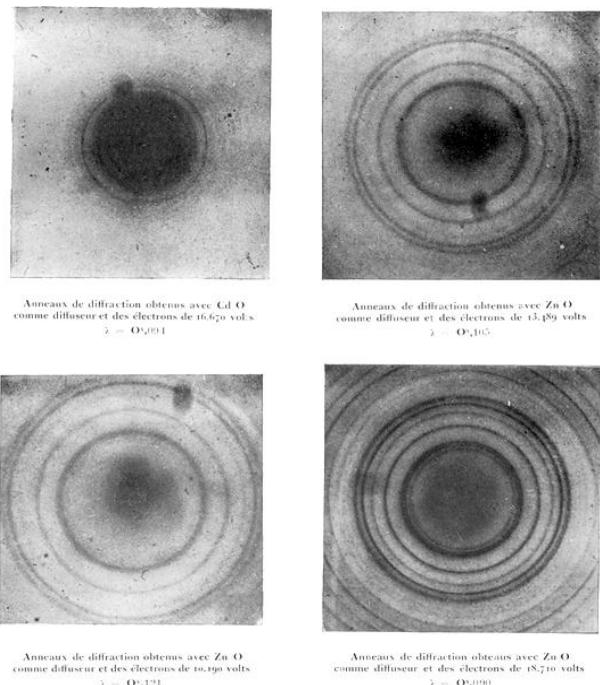


Дж.П. Томсон, Л.де Бройль и К. Дж. Дэвиссон  
после конференции в Глазго,  
созванной Британской ассоциацией  
развития науки, 1928 г. [165]

В заметках о своей научной работе, написанных де Бройлем в 1931 г., которые хранятся в архиве в Институте Франции, были приведены картины дифракционных колец [217]. На рис. 17 изображены фотографии дифракционных картин из этой работы де Бройля. Верхняя левая картина на рис. 17 получена на кристалле CdO при ускоряющей разности потенциалов  $U=16,670$  В, остальные соответствуют дифракции электронов, полученных для кристалла ZnO при разных значениях  $U$ , с соответствующими длинами волн от  $0,090$  Å до  $0,121$  Å. Де Бройль описывал эксперименты по дифракции электронов, обращая внимание на все подробности их осуществления.

Основные публикации по исследованию дифракции электронов Дэвиссона и Джермера, Томсона и Рейда в 1927 г. разделяли всего несколько месяцев. За свои исследования электронной дифракции Дэвиссон и Томсон получили Нобелевскую премию по физике в 1937 г. После блестящего подтверждения теории о волнах, связанных с движением материальных частиц, Л. де Бройль писал: «Явление дифракции электронов, как вначале казалось, очень трудно наблюдалось

мое и требующее высокого искусства экспериментатора, теперь стало относительно простым и повседневным. Приборы для наблюдения дифракции стали настолько совершенными, что сегодня это явление можно демонстрировать студентам на лекции» [16, с. 149]. Де Бройль отмечал также в связи с экспериментами по дифракции электронов, что поскольку для больших значений энергии (до миллиона электрон-вольт) необходимо учитывать релятивистские поправки в формуле длины волны, то косвенно эти эксперименты служили и подтверждением результатов теории относительности.



*Рис. 17. Фотографии дифракционных картин, хранящиеся в архиве Л. де Бройля [217]*

В дальнейшем, после 1927 г., стали известны и другие исследования дифракции волн материи. Успешно была исследована дифракция атомов и молекул И. Эстерманом и О. Штерном, результаты их исследований опубликованы в серии статей под названием «Исследования молекулярных пучков» [271]. Штерн и его коллеги ставили перед собой цель проверить гипотезу де Бройля, в вводной статье написано: «Наиболее фундаментальное значение имеет вопрос о реальном существовании волн де Бройля, т.е. вопрос о том, могут ли наблюдаваться для молекулярных лучей, по аналогии со световым лучом, эффекты рассеяния и интерференции?» (Цит. по [166, с. 138]). Направляя пучки водорода  $H_2$  и гелия  $He$  на очищенные поверхности кристалла  $LiF$ , они получили удовлетворительное согласие полученной длины волны с формулой де Бройля. Длина волны у частиц атомно-молекулярного масштаба в такого рода экспериментах чрезвычайно мала, например, при комнатной температуре у молекул водорода

она около  $10^{-8}$  см и составляет тот же порядок, что и расстояние между узлами кристаллической решетки большинства кристаллов. Для атомных волн поверхность кристаллов представляет естественную дифракционную решетку.

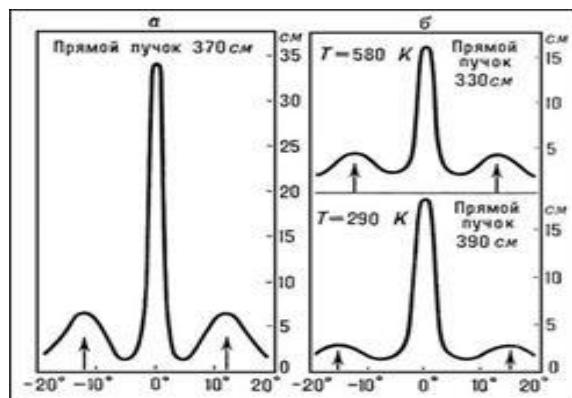


Рис. 18. Дифракция молекулярных пучков [171]

Качество дифракционной картины зависит от природы молекулярных лучей и от свойств кристаллической поверхности, наиболее подходящими кристаллами в первых экспериментах являлись LiF и NaCl [166, 171]. На рис. 14 изображены зависимости дифракции для молекул  $H_2$  от кристалла LiF (а), и для молекул He от LiF (б), по оси абсцисс отложен угол поворота приемника, по оси ординат - интенсивность дифрагированных лучей, выраженная в условных единицах. Мерой интенсивности падающего пучка молекул являлось установившееся давление газа в камере. Центральный максимум на рис. 18 соответствует зеркально отраженным лучам, а боковые – дифрагированным лучам  $\pm 1$  порядка, стрелками указаны вычисленные положения дифракционных максимумов, которые в пределах ошибок измерений совпадают с экспериментальными.

В своей Нобелевской речи 12 декабря 1929 г. де Бройль писал, что «электрон больше не может рассматриваться как простая малая частица электричества. Его необходимо ассоциировать с волной, и эта волна не является мифом» [29, с. 552].

Через четыре года после открытия нейтрона, в 1936 г. В. Эльзассер предположил, что нейтроны могут дифрагировать на кристаллах, и он установил ожидаемую интенсивность пучка нейtronов, который давал дифракцию Брэгга. Работа Ф. фон Хальбана и Р. Прейсверка по экспериментальному доказательству нейтронной дифракции вышла в 1936 г. в докладах Французской академии наук [306]. Так было доказано, что волновые свойства присущи всем без исключения частицам.

В 1949 г. советские физики Л.М. Биберман, Н.Г. Сушкин и В.А. Фабрикант осуществили эксперимент, в котором интенсивность электронного пучка была настолько слабой, что электроны проходили че-

рез кристалл поодиночке. Промежуток времени между двумя последовательными прохождениями электронов через кристалл примерно в 30 000 раз превосходил время, затрачиваемое электроном на прохождение всего прибора. При достаточной экспозиции была получена дифракционная картина, ничем не отличающаяся от той, какая наблюдалась при обычной интенсивности пучка, и это явилось доказательством того, что волновые свойства присущи отдельному электрону.

Вслед за экспериментальными работами по дифракции нейтронов была разработана полная теория этого вида дифракции. Требуемые монохроматичные пучки нейтронов большой интенсивности можно было получить только после создания ядерных реакторов в 1946 г. Вслед за открытой оптической голограммой, с помощью электронных волн была также получена голографическая запись объектов. Таким образом, диссертация Л.де Бройля не только послужила стимулом к развитию квантовой механики, но и открыла новые экспериментальные возможности, в частности, создание новых видов интерферометров, и изобретению электронного микроскопа [276]. На явлении дифракции частиц материи основаны два современных метода анализа атомной структуры вещества – электронография и нейtronография. В истории физики экспериментальное наблюдение дифракции частиц вещества, последовавшее после теоретического предсказания этого явления Л. де Бройлем, является редким примером, когда экспериментальное доказательство следует за теорией.

История физики показывает, что для признания принципиально новых идей необходимо время и неопровергимые экспериментальные факты. Счастливая судьба теоретического открытия Л. де Бройля опровергает это правило. Экспериментальное подтверждение волн материи, которое было получено в короткие сроки, способствовало стремительному развитию копенгагенской интерпретации квантовой механики.

## **ГЛАВА 5. ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ В РАБОТАХ ДЕ БРОЙЛЯ 1923-1927 ГГ.**

### **5.1. Теория двойного решения: статья «Корпускулярная структура вещества и излучения и волновая механика» 1927 г.**

Открытие де Бройлем фазовых волн послужило началом работы для Э. Шредингера над нерелятивистским волновым уравнением для электрона, которое описывало движение волн де Бройля, их эволюцию в пространстве и во времени с учетом силового поля. Л. де Бройль приветствовал работы Шредингера, применил его подход для написания релятивистского волнового уравнения, которое было опубликовано в 1926 г. Но, как писал сам де Бройль, «после работ Шредингера 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» [14, с. 352].

В течение 1926–1927 гг. Л. де Бройль, опираясь на достижения Шредингера, пишет обзор, в котором излагает принципы новой волновой механики, а также развивает свою теорию. Он публикует ее в «Journal de Physique» (русский перевод [27]) под названием «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения». 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», писал де Бройль [14, с. 352]. Дело в том, что де Бройль был не согласен с представлением только волны, названной Шредингером волной  $\psi$ , без рассмотрения частицы, связанной с этой волной. Впервые идея фазовой волны появилась у де Бройля именно в связи с движущейся частицей. Существование волна – частица составляло предмет его размышлений, начиная с 1923 г. Целью было получить ясную картину этого дуализма в рамках пространства и времени, для этого де Бройлю нужно было добиться встраивания частицы в волну. Де Бройль писал: «Когда я впервые пришел к идеям волновой механики, то нисколько не сомневался в необходимости создания таким путем синтетической теории, в которой понятия волны и частицы сохранили бы свой обычный характер» [Там же]. Кроме того, де Бройля не удовлетворяла вероятностная интерпретация волны  $\psi$ . Борн предложил в 1926 г. интерпретировать величину  $\psi\psi^*dxdydz$ , где  $\psi^*$  – комплексная величина, сопряженная с  $\psi$ , как вероятность того, что электрон находится в бесконечно малом элементе объема  $dxdydz$  [11].

В короткий период 1926–1927 гг. шла интенсивная работа и поиск физического смысла математического формализма новой квантовой механики. Создатели матричной механики – Борн, Йордан, Гейзенберг, и независимо от них Дирак, волновой механики – де Бройль и Шредингер совместно с другими физиками–теоретиками применили формулировки квантовой теории к решению различных проблем. При этом было показано, что язык символов любой из формулировок может быть переведен на язык двух других. Математический аппарат квантовой механики был создан. М. Борн отмечал, что появление аппарата, с помощью которого физические события на атомном уровне могут быть объяснены строго математически, предшествовало «пониманию», и считал это закономерным [291, с. 169]. Предложенное Шредингером дифференциальное уравнение являлось составной частью математического аппарата классической физики. Оно позволяло анализировать гармонические колебания и предсказывать состояние волны в любой заданный момент времени, исходя из начальных условий. Создавалось представление о том, что движение электрона но-

сит волновой характер, а то, что кажется частицей, на самом деле является малой областью пространства, где волны усиливают друг друга. Но волны, описываемые уравнением Шредингера, не имели ничего общего с распространением обычных механических колебаний. Лишь для единичного электрона верно представление в виде волнового возмущения в трехмерном пространстве. Два электрона можно было представить только в шестимерном пространстве и т.д.

М. Борн, так же как и Н. Бор, считал, что элементарные частицы не являются ни частицами, которые изучает классическая механика, ни волнами новой волновой механики. Но функция  $\psi$ , которая появилась в квантовой механике, должна была иметь смысл, а не просто абстрактное выражение. Исключительную роль сыграла школа физики, возглавляемая Бором, предложив копенгагенскую интерпретацию квантовой механики. В новой механике рассматривались волны вероятности, не обладающие непосредственной физической реальностью. Философия квантовой механики нашла свое выражение в соотношениях неопределенностей Гейзенберга и в принципе дополнительности Бора. Эта интерпретация появилась в 1927 г., а до того велись мучительные поиски, прежде всего Бором, Шредингером, Борном, Гейзенбергом, физического смысла корпускулярно-волнового дуализма. Значительным событием в этом направлении являлась теория двойного решения де Бройля. Она не имела ничего общего с вероятностным подходом к описанию движения микрообъекта, отрицающим возможность измерения его траектории. Несмотря на невозможность завершения предложенной де Бройлем теории двойного решения, она все-таки сыграла положительную роль, заострив внимание на нерешенных вопросах.

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. Он неоднократно в своих работах ставил вопрос: «Но что же, в самом деле, означает эта двойственность? Это очень трудный вопрос, который еще далек от полного разъяснения» [22, с. 11]. Сомнения в правильности интерпретации квантовой теории прозвучали и в речи Л. де Бройля при вручении Нобелевской премии в 1929 г.: «Можно ли все еще предполагать, что в каждый момент времени частица занимает в волне четко определенное положение, и что волна при ее распространении увлекает частицу подобно тому, как волна на воде увлекает плавающую пробку? Это те трудные вопросы, обсуждение которых завело бы нас в слишком далекие области философии. Все, что я об этом скажу здесь, - это то, что сегодня имеется тенденция допускать, что невозможно постоянно приписывать частице точно определенное положение в волне» [29, с. 548].

Еще в 1924 г., готовясь к защите диссертации, де Бройль составил программу дальнейшего поиска синтетической теории, в которой

понятия волны и частицы сохранили бы обычный характер. В статье, написанной в ноябре 1924 г. «О динамике квантов света и интерференции», где Бройль подчеркивал, что «никакая теория не будет истинно ясной, если в ней не будет определена структура волны и природа особенности, созданной частицей, движение которой можно было бы описать, основываясь целиком на волновой точке зрения» (русс. перевод [29, с. 202]). На протяжении нескольких лет, вплоть до 1927 г., где Бройль занимался воплощением этой программы. Элементы теории двойного решения и ее упрощенного вида – теории волны-пилота - появились еще в диссертации де Бройля, задолго до матричной или волновой механики. Далее он развивал теорию с учетом появившегося волнового уравнения Шредингера и вероятностного смысла волновой функции. Теория двойного решения, опубликованная в 1927 г. в статье «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения»[27], явилась кульминацией независимой работы де Бройля, которая началась в 1923 г.

Статья предшествовала докладу де Бройля на Сольвеевском конгрессе. В ней изложена теория двойного решения: наряду с гладкой непрерывной волной, рассматриваемой Шредингером, должна быть другая волна, содержащая сингулярность – очень высокую и острую точку, представляющую частицу. «В способе рассмотрения, принятом здесь, материальная точка - главная реальность» - пишет де Бройль [29, с. 229]. У этой теории есть своего рода предшественник в виде концепции Эйнштейна «волны-призрака». Статья Эйнштейна называлась «Волновая механика Шредингера 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 [219] 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. Анализ представления де Бройля о сингулярности в волне (они называют ее «волна с горбом»), когда эволюция волны управляет уравнением Шредингера, сделан учениками де Бройля Лошаком и Андраде э Сильва [1]. Они пишут, что линейность уравнения Шредингера «препятствует тесному союзу между движением сингулярности и эволюцией поля». И на первый взгляд можно подумать, что де Бройль пытается отыскать уравнение волны, более общее, чем уравнение Шредингера. В каком-то смысле это так. В силу линейности уравнения Шредингера, сумма двух решений сама явля-

ется решением, поэтому де Бройль представляет «волну с горбом» в виде суммы  $u = u_0 + v$ , где  $u_0$  - сингулярная волна,  $v$  - регулярная волна, с теми же свойствами, что и волна  $\psi$ . Физический смысл волны  $u$  связан с корпускулярно-волновым дуализмом: вблизи сингулярности амплитуда волны  $u_0$  гораздо больше амплитуды волны  $v$ , и  $u = u_0$ . При удалении от сингулярности в результирующей волне будет преобладать волновой аспект  $u = v$ . В 1965 г. в журнале «Техника – молодежи» де Бройль совместно с Лошаком представил популярное изложение основной идеи теории двойного решения [20]. Несмотря на то, что после возвращения де Бройля в 1951 г. к оставленной им теории двойного решения прошло много времени, она выглядела всего лишь наброском, далеким от завершения.

Де Бройль в теории двойного решения показывает, что уравнения волновой механики всегда допускают два связанных между собой решения: одно с постоянно меняющейся амплитудой, которое описывает статистический аспект движения некоторого облака частиц, другое - содержит сингулярность, и представляет частицу,строенную в волновое движение. 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» [20, с. 14].

Хотя в теории де Бройля содержится много моментов, схожих с исследованиями Эйнштейна в этот же период, Эйнштейн не ссылается на работы де Бройля и остается в тени, когда теория де Бройля обсуждается на Пятом Сольвеевском конгрессе. В статье Эйнштейна, которая открывает сборник, посвященный 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 внущили основы статистической квантовой теории. Это чувство, я знаю, не было чуждо и самому Луи де Бройлю» [291, с. 4]. Исследования Эйнштейна в 1927 г. были сконцентрированы на рассмотрении проблемы движения частиц в общей теории поля.

Цель де Бройля – получить физически ясную картину корпускулярно-волнового дуализма, согласующуюся с классическими представлениями о пространстве и времени. Он задается 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 сопряженных решения; одно решение, допускающее особенность, реально представляло бы собой существующую частицу, включенную в волновое явление, тогда как другое решение, с непрерывно меняющейся амплитудой, давало бы лишь статистическую сторону перемещения облака частиц» [14, с. 354]. Рассматривая движение материальной точки с собственной массой  $m_0$ , в случае отсутствия поля, де Бройль записывает решение волнового уравнения

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{4\pi^2 v_0^2}{c^2} u,$$

где  $v_0 = m_0 c^2 / h$ ,

в виде  $u(x, y, z, t) = f(x, y, z, t) \cos 2\pi v \left[ t - \frac{z}{V} + \tau \right]$ . (1)

В записи уравнения (1) учтено, что частота волны связана с полной энергией  $W$

$$v = v_0 / \sqrt{1 - \beta^2} = W / h, \quad V = c / \beta.$$

Далее исследуется вопрос о форме функции  $f(x, y, z, t)$ , которая, как предполагает де Бройль, «представляет сингулярность там, где находится материальная точка». Если ансамбль значений  $f$  рассматривать как блок, параллельный направлению движения частицы со скоростью  $v$ , и записать функцию в виде  $f(x, y, z - vt)$ , то при подстановке в волновое уравнение получится связь  $vV = c^2$ , которая приводит, как уже доказывалось в диссертации, к равенству скорости материальной точки и групповой скорости однородных плоских волн. Таким образом, решение волнового уравнения может представляться группой однородных волн близких частот. Де Бройль рассматривает облако материальных точек с одинаковой скоростью движущихся в направлении оси  $z$ . Общее волновое явление можно представить функцией

$$U(x, y, z, t) = \left| \sum_i f_i(x, y, z - vt) \right| \cos 2\pi v \left[ t - \frac{vz}{c^2} \right].$$

Амплитуда содержит большое число сингулярностей, движущихся со скоростью  $v$  вдоль оси  $Oz$ . Непрерывное решение

$$\psi(x, y, z, t) = a \cos 2\pi v \left[ t - \frac{vz}{c^2} \right]$$

соответствует сингулярному решению (1). Де Бройль называет число корпускул в единице объема  $\rho$  - плотностью облака и предполагает, что она имеет всюду постоянное значение:  $\rho = ka^2$ . Таким образом, непрерывное решение, с одной стороны, дает распределение фаз в облаке точек, с другой, квадрат его амплитуды является мерой плотности облака.

В 1926 г. Э. Маделунг опубликовал статью «Квантовая теория в гидродинамической интерпретации» [300], в которой волновая функ-

ция представляет ламинарный поток некоторой «несжимаемой жидкости», плотность которой определяется квадратом амплитуды волны, а скорость течения – некоторой функцией ее фазы. Следовательно, подобно тому, как волна полностью задается своей амплитудой и фазой, так и движение жидкости определяется ее плотностью и скоростью течения. Де Бройль, опираясь на идею Маделунга, предлагал рассматривать интенсивность волны  $\psi$  как плотность фиктивной жидкости, перемещающейся в пространстве с течением времени. Он пишет: «я пришел к гидродинамическому истолкованию Маделунга, но дополненному структурной картиной волн с корпускулярными особенностями» [14, с. 354]. Гидродинамическая аналогия дает возможность наглядно выразить некоторые представления волновой механики. Как движение пробки, плавающей на поверхности равномерно текущей реки, зависит от места, в которое ее поместили, и от характера течения воды, так и в интерпретации волновой механики с помощью волны с горбом можно представить «математическую» жидкость Маделунга регулярной волной, плотность которой в каждой точке равна интенсивности волны, а скорость течения определяется ее фазой. Эта скорость, как и для реальной жидкости, позволяет определить линии тока, которые также будут зависеть от условий течения. Неоднородность в этой абстрактной жидкости, которая является сингулярностью, будет перемещаться в силу закона равенства фаз по линиям тока, как пробка следует по линиям тока реки.

Желая примирить противоположные представления о волне, связанной с частицей, де Бройль развивает идею о том, что «уравнения волновой механики всегда допускают два сопряженных решения; одно решение, допуская особенность, реально представляло бы существующую частицу, включенную в волновое явление, тогда как другое решение, с непрерывно изменяющейся амплитудой, давало бы лишь статистическую сторону перемещения облака частиц» [Там же].

Для движения материальной точки в поле, определяемом потенциальной функцией  $F(x,y,z,t)$ , де Бройль выводит скорость материальной точки в направлении нормали к поверхности равного действия  $\phi = \text{const}$ :

$$\vec{v} = \frac{c^2 \overrightarrow{\text{grad}}\phi}{W - F}.$$

В ньютоновском приближении (де Бройль специально останавливается на этом вопросе в разделе «Переход от старых механик к новой») разность энергий, стоящих в знаменателе, может быть заменена на  $m_0 c^2$ , в результате чего получается уравнение, связывающее импульс материальной точки и  $\text{grad}\phi$

$$m_i \vec{v}_i = \vec{\nabla}\phi.$$

Следует подчеркнуть, что де Бройль получил свой закон скоростей из рассмотренной им в 1923-1924 гг. аналогии между принципами

Мопертюи и Ферма, и, таким образом, сущность динамики кванта де Б्रойля появилась до работ Шредингера, а не как их развитие. В свою очередь уравнение Шредингера получено как развитие внутренней логики теории де Б्रойля благодаря оптико-механической аналогии. Связь, которую де Б्रойль открыл в теории двойного решения, заключалась в рассмотрении корпускулы как носителя периодического явления, колебания которого находятся в фазе с регулярной волной, сопровождающей движение.

В докладе на Сольвеевском конгрессе де Б्रойль представил сокращенный вариант своей теории (перевод на русский язык выполнен в [148]). Он высказывал более осторожную точку зрения, рассматривая частицу, которую увлекает за собой распространяющаяся волна. Волна в определенном смысле ведет (пилотирует) частицу. В статье «Волновая механика и корпускулярная структура...» де Б्रойль в заключении описывает существование волны-пилота как постулат непрерывной волны, управляющей движением частицы. Он пишет: «Придумаем непрерывную волну, управляющую движением частицы. Это волна-пилот» [23, с. 248]. Движение точки в этой непрерывной волне определяется уравнением

$$\vec{v} = -c^2 \frac{\overrightarrow{\text{grad}}\phi + \frac{e}{c} \vec{A}}{\frac{\partial \phi}{\partial t} - e\gamma}.$$

«В этой, менее четкой форме, моя теория отказывалась ...от включения частицы в волну и ограничивалась констатацией волново-корпускулярной двойственности, не пытаясь больше уточнить ее природу», - вспоминал позднее де Б्रойль [14, с. 355].

## 5.2. Доклад де Б्रойля «Новая динамика кванта» на Пятом Сольвеевском конгрессе 1927 г.

Первая мировая война нанесла серьезный ущерб международным научным связям и оставила след в истории Сольвеевских конгрессов [153, 157]. В послевоенные годы существовала сильная враждебность французских и бельгийских ученых по отношению к научным связям и встречам с немецкими учеными. «Манифест 93-х», подписанный 93 представителями немецкой культуры и науки, в том числе Нернстом и Планком, исключение составил Эйнштейн, явился призывом к цивилизованному миру, в котором отстаивалась «пылкая любовь к собственному отечеству и творческая работа на пользу ему» [157, с. 29]. После Второго Сольвеевского конгресса в 1913 г. немецкие физики не приглашались на конгрессы, никто из них, включая Эйнштейна (он написал Лоренцу письмо с просьбой не направлять ему приглашения из-за исключения немецких ученых) не участвовал в работе Третьего конгресса в 1921 г., и Четвертого - в 1924 г. И это ог-

раничение было снято только в 1927 г., когда Германия готовилась войти в Лигу наций. Лоренц получил одобрение на включение Эйнштейна в состав Научного комитета по подготовке Пятого Сольвеевского конгресса, который состоялся 24-29 октября 1927 г. Тема конгресса была «Электроны и фотоны». «Состав приглашенных был блестящим, с относительным преобладанием немецких теоретиков», - пишет О.А. Старосельская-Никитина [157].

Лоренц предложил Эйнштейну выступить на Пятом Сольвеевском конгрессе с докладом на тему, связанную с работами Эйнштейна 1924-1925 гг. по квантовой статистике. В июне 1927 г. он получил ответ, в котором Эйнштейн писал: «Я помню, что пообещал Вам выступить с докладом о квантовой статистике... После долгих размышлений и колебаний я пришел к убеждению, что недостаточно компетентен для того, чтобы прочитать доклад, который отражал бы нынешнее положение вещей. Это связано с тем, что я не мог активно участвовать в развитии квантовой теории... Частично это объясняется тем, что я не очень способен к восприятию происходящих бурных изменений, а частично тем, что я не одобряю чисто статистический подход, на котором базируются новые теории» [118, с. 414].

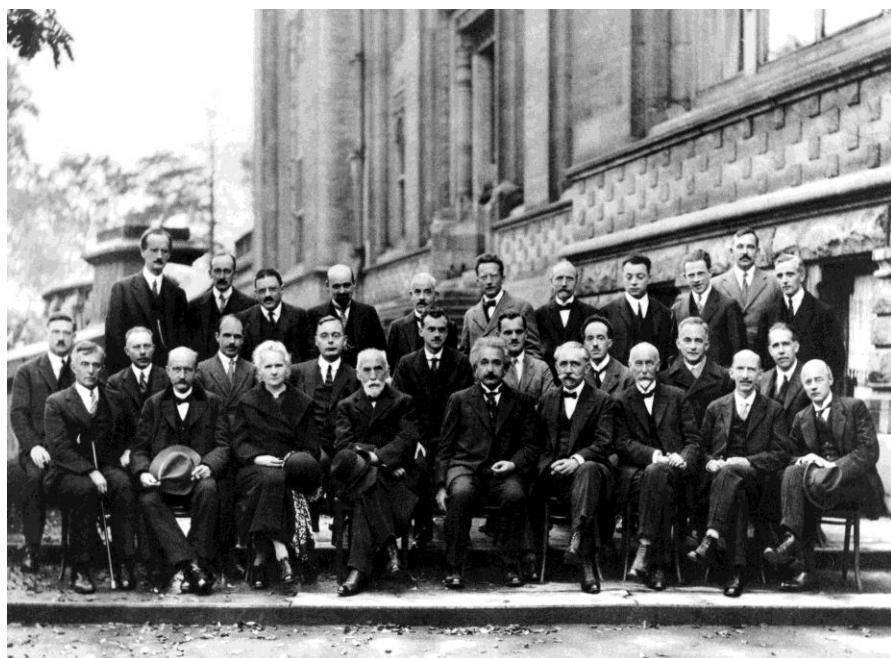


Фото участников Пятого Сольвеевского Конгресса, 1927 г.

Такие же приглашения были направлены де Бройлю, Шредингеру, Борну, Комptonу, Брэггу. Весной 1927 г. де Бройль принял приглашение Х.Лоренца, председательствующего на первых Сольвеевских конгрессах, выступить с докладом о волновой механике на Пятом Сольвеевском конгрессе.

Доклад Л.де Бройля назывался «Новая динамика кванта», и в нем де Бройль хотел прежде всего изложить результаты своих ранних

работ и представить дальнейшее развитие его идей Шредингером и Борном. А, главное, представить новую теорию волны-пилота, которая, по мнению автора, отвечала на главный вопрос волновой механики - что связывает между собой волны и корпускулы?

В архиве де Бройля хранится написанная его рукой декларация будущего выступления на Пятом Сольвеевском конгрессе [217]. Де Бройль писал, что до сих пор, чтобы сформировать картину некоторого явления, пользовались понятиями пространства и времени: «Для меня эти понятия являются ясными и, признаюсь, что я не могу себе представить какую-либо идею Физики без этих понятий». Далее де Бройль рассуждает, пользуясь представлением локализованной в пространстве частицы: «Для меня электрон – это некая частица, которая в данный момент времени находится в определенной точке пространства, и если у меня возникла мысль о том, что в другой момент времени она находится где-то еще, то я должен думать о ее траектории, которая является некоторой линией в пространстве. И если этот электрон встречает некоторый атом и проникает в него, а после покидает этот атом, я должен придумать некую теорию, в которой этот электрон сохраняет свою индивидуальность... Вполне очевидно, что такая теория с большим трудом может быть развита, но *a priori* это не кажется мне не возможным». Его рассуждения заканчиваются вопросами: Сможет ли более глубокий ум прояснить движения электронов? Нужно ли обязательно настаивать на индетерминизме в принципе?

Материалы конгресса, опубликованные в [219], опровергают некоторые установившиеся представления о теории Л. де Бройля, изложенные в многочисленных исследованиях, посвященных истории квантовой механики. Например, М. Джеммер пишет, что «причинная интерпретация де Бройля фактически даже не обсуждалась на Конгрессе, если не считать нескольких замечаний Паули» [53, с. 345]. Юкава утверждает, что выступление де Бройля было «жестоко разгромлено» Паули [214]. Старосельская-Никитина также подчеркивает имевшиеся «антагонистические моменты» со стороны представителей вероятностной трактовки Бора, Борна, Гейзенберга и Паули. Она пишет: «Нельзя забывать, что это была первая встреча представителей политически враждебных наций... С другой стороны, на конгрессе оказались представлены два различных научных направления. Самый отчет о конгрессе производит впечатление двух взаимно настороженных друг против друга групп» [157, с. 37]. Эта острота сгладилась после выступления Бора в общей дискуссии, последовавшей за основными докладами Брэгга, де Бройля, Шредингера и совместного Гейзенберга и Борна. Бор подчеркнул, что согласно фундаментальным представлениям де Бройля понятие волны столь же необходимо для описания свойств материальных частиц, как и для объяснения свойств света.

Стенограмма дискуссий, состоявшихся сразу после доклада де Брайля и по окончании всех заявленных докладов, договорит об определенном интересе к новой теории «волны-пилота», предложенной де Брайлем [219, с. 364-371]. В дискуссии приняли участие Х. Лоренц, М. Борн, Э. Шредингер, 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 [305] в разделе, посвященном Сольвеевским конгрессам 1927 г. и 1930 г., о докладе де Брайля автор пишет, опираясь на воспоминания самого де Брайля, а также приводит отзыв о теории волны-пилота, сделанный Паули в письме к Бору на кануне конгресса. Паули писал, что предложенная теория - «интересная и вдохновляющая попытка», хотя он находит ее «чуждой по духу и сомнительной», т.к. она поворачивает назад колесо истории [305, с. 1003].

Доклад де Брайля на Пятом Сольвеевском конгрессе начинается с изложения основных положений новой динамики, он рассматривает собственные работы, а также работы Шредингера и Борна [148].

Новая динамика, которую первым предложил де Брайль, отличается от «старых динамик», к которым он относит и классическую механику Ньютона и релятивистскую механику Эйнштейна. Де Брайль показывает в докладе, что, несмотря на разделяющие их отличия, старые динамики 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 трех начальных координат и трех составляющих начальной скорости. Новая динамика, т.е. волновая механика свободной материальной точки, задается уравнением

$$\Delta u - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{4\pi^2 v_0^2}{c^2} u,$$

«некоторые решения которого соответствуют прежним динамикам. Но существуют другие решения... они отвечают за возможные состояния движения, не предусмотренные прежними теориями» [29, с. 232].

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

$$W = hv = \frac{\partial \phi}{\partial t}, \vec{p} = \frac{hv}{V} = -\overrightarrow{\text{grad}\phi}.$$

Де Брайль 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» [Там же, с. 196].

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

Своё завершение новая концепция механики, предложенная де Бройлем, получила благодаря работам Э. Шредингера. Шредингер 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» [Там же, с. 197]. В докладе на конгрессе де Бройль излагает основные достижения Шредингера в этом направлении. Фундаментальная идея Шредингера 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

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

где амплитуда  $a$  является постоянной величиной.

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

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

Он предположил, что волновые функции должны быть конечными, однозначными и непрерывными, и получил набор функций для амплитуды, который представляет различные стабильные состояния атома. Де Бройль поднимает вопрос: поскольку «мистер Шредингер рассматривал непрерывные волны, т.е. волны, амплитуды которых не имеют особенностей. Как тогда можно представить материальную точку?» [148, с. 15].

Частицу Шредингер 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 ее длины» - отвечает на свой поставленный вопрос де Бройль. В случае атома, имеющего те же размеры, что и длина волны, частицу определить нельзя, нель-

зя говорить о положении или скорости электрона в атоме. Далее в докладе де Бройль анализирует решение Шредингера для системы N частиц и обращает внимание на трудности концептуального плана: «Конфигурационное пространство сформировано с помощью координат точек, и тем не менее мистер Шредингер полагает, что в атомных системах материальные точки не имеют точно определяемого положения. Кажется немного парадоксальным создавать конфигурационное пространство с координатами точек, которые не существуют» [Там же]. Де Бройль указывает, что разными авторами получено 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  $\psi$  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  $\psi$ » и посвящена ответу на вопрос: Что связывает между собой волны и корпускулы? Он рассматривает сначала движение одиночного электрона в электромагнитном поле ( $\gamma$ ,  $\vec{A}$  - электромагнитные потенциалы). Если волна  $\psi$  записана в форме

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

то уравнение для скорости частицы:

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

Затем де Бройль переходит к рассмотрению облака одинаковых невзаимодействующих корпускул и утверждает, что плотность облака позволяет определить вероятность присутствия частицы в объеме пространства:

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

где  $K$ - константа.

Для случая равномерного и прямолинейного движения частиц облако можно представить плоской волной, где частица имеет неко-

торую вероятность пребывать в любой точке облака. Де Бройль делает вывод: «Волна  $\psi$  появляется и как пилот–волна, и как волна вероятности» [148, с. 18]. Де Бройль в докладе постулирует основные уравнения динамики волны–пилота, которые полностью определяют движение частицы, если известно ее положение в начальный момент времени. «Короче говоря, в нашей гипотезе каждая волна  $\psi$  определяет «класс движений» и каждое из них дается уравнением (1), когда известно начальное положение частицы. Если не учитывать это начальное положение, то формула (2) дает вероятность присутствия частицы в элементе объема  $d\tau$  в момент  $t\dots$ . 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 [Там же].

При нерелятивистском приближении, когда  $\partial\phi/\partial t - e\gamma \approx m_0c^2$ , уравнения (1) и (2) приобретают вид:

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

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

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

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

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

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

$$\vec{v} = -\frac{c^2}{\hbar v} \text{grad}\phi,$$

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

Таким образом, световые и темные 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  $\psi$ , 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» [Там же, с. 21].

После де Бройля на конгрессе с докладом «Квантовая механика» выступили М. Борн и В. Гейзенберг. Они подробно рассказали о

матричной механике, теории преобразований и вероятностной интерпретации. «Квантовая механика ведет к точным результатам относительно средних значений, но не дает информации о деталях индивидуального события. Следует отказаться от детерминизма, который до сих пор считался основой точных наук. Каждое движение вперед в нашем понимании формул обнаруживало, что последовательная интерпретация квантовомеханического формализма возможна только в предположении фундаментального индетерминизма» - прозвучало в их докладе [219, с. 396]. В конце доклада была победная фраза, закрепившая успех индетерминизма: «Мы утверждаем, что квантовая механика является полной теорией, а ее основные физические и математические гипотезы более не нуждаются в модификации» [Там же, с. 398].

В истории квантовой механики уже опровергалось утверждение Гейзенберга о том, что их «партии удалось победоносно отразить все нападения», такая оценка результатов конгресса является односторонней. Ознакомление с материалами конгресса показывает далеко не победоносный и не завершенный характер лишь начавшейся там дискуссии. На самом деле, возникшие в 1927 г. разногласия не прекращались никогда, и касались они не основ квантовой механики, а копенгагенской интерпретации ее основных положений. «Такие учёные, как Эйнштейн и Шредингер, всегда отказывались признать вероятностную интерпретацию и выдвигали против нее возражения с Сольвеевского конгресса 1927 г.» - писал де Бройль (прил. 4, [6, с. 195]).

### 5.3. Дискуссия по докладу де Бройля

В дискуссии, состоявшейся 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. Бриллюэн продемонстрировал значение формул де Бройля на примере отражения фазовой волны де Бройля от плоского зеркала (рис. 19).

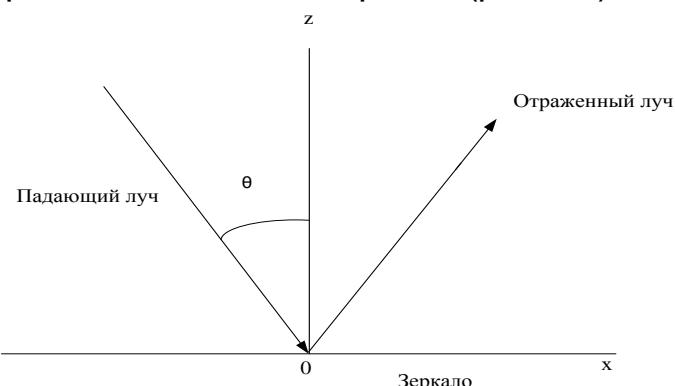


Рис. 19. Отражение фазовой волны де Бройля от плоского зеркала

Если волна плоская и распространяется свободно, то траектории частиц определяются лучами перпендикулярными к волновой поверхности. Предположим, что волна отражается от плоского зеркала,  $\theta$  - угол падения. Волновое движение вблизи зеркала описывается суперпозицией падающей волны

$$\psi_1 = a_1 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x \sin \theta - z \cos \theta}{\lambda} \right)$$

и отраженной волны

$$\psi_2 = a_1 \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x \sin \theta + z \cos \theta}{\lambda} \right),$$

в результате чего получается уравнение стоячей волны

$$\psi = 2a_1 \cos \frac{2\pi z \cos \theta}{\lambda} \cos 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x \sin \theta}{\lambda} \right).$$

Эта волна согласуется с канонической формой де Броиля

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

где  $a = 2a_1 \cos \frac{2\pi z \cos \theta}{\lambda}$  и  $\varphi = h \left( \frac{t}{T} - \frac{x \sin \theta}{\lambda} \right)$ .

Применим формулы, полученные де Бройлем, и предположим, что световая волна направляет фотоны, скорость которых определяется  $\vec{v} = -(c^2/h\nu) \vec{\text{grad}}\varphi$ . Мы видим, что бомбардирующие частицы движутся параллельно к зеркалу со скоростью  $v_x = c \sin \theta$ , меньшей  $c$ . Их энергия остается равной  $h\nu$ , их масса согласно де Бройлю претерпевает изменения

$$M_0 = \sqrt{m_0^2 - \frac{h^2}{4\pi^2 c^2} \frac{a}{a}} = \frac{h\nu}{c^2} \cos \theta.$$

Масса фотона, которая равна нулю в случае свободного распространения волн, принимает не нулевые значения в области, где происходит интерференция волн.

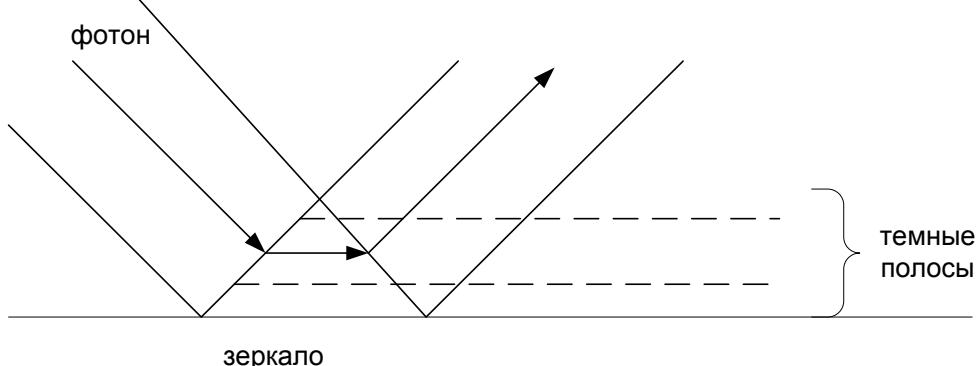


Рис. 20. Образование интерференции падающего и отраженного пучков света

Траектория фотона сначала прямолинейна в падающем узком пучке, затем искривляется в области, где происходит интерференция

из-за наложения двух пучков света (падающего и отраженного), затем фотон уходит, следуя направлению отраженного луча света (рис. 20). 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 нее частиц испытывает давление? - де Бройль задавал в статье «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения» [29, с. 250]. «Это возможно только посредством напряжений, которые действуют в области интерференции. Из-за этих напряжений стенка должна испытывать такое же давление, которое производили бы на нее частицы, сообщая импульс при отражении от ее поверхности. И это именно показывает вычисление, проведенное с применением формул Шредингера» - отвечал на свой вопрос де Бройль [Там же].

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. На этот вопрос отвечал Бриллюэн: Не существует теории, прямо отвечающей на вопрос Крамерса. Эйнштейн задал единственный вопрос: Предполагается, что фотоны движутся параллельно зеркалу со скоростью  $c \sin\theta$ , но что случится, если падение перпендикулярно? Будут ли фотоны иметь нулевую скорость, как того требует формула ( $\theta=0$ )? В дискуссии на этот вопрос Эйнштейна ответил Пиккард. Он подтвердил, что в случае отражения можно предположить, что компонента скорости, параллельная зеркалу, константа. В интерференционной зоне исчезает компонента, перпендикулярная зеркалу. Чем больше угол падения, тем больше фотоны замедляются. Таким образом, действительно, при нормальном падении на зеркало фотоны останавливаются. В продолжение этого вопроса выступил Ланжевен. Он получил развернутый ответ де Бройля на свой вопрос: В интерференционной зоне фотоны не имеют скорости равные скорости света. Таким образом, они не всегда имеют скорость  $c$ ? Де Бройль ответил, что в его теории скорости фотонов равны с только вне интерференционной зоны, когда излучение распространяется свободно в вакууме. Как только возникают интерференционные явления, скорость фотонов становится чуть меньше  $c$ .

В выступлении Паули не было вопроса, это было, скорее, замечание в связи с математическим базисом теории де Бройля при рассмотрении частиц, двигающихся по определенным 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 Сле-

тером, когда световые кванты следуют вдоль линий вектора Пойнtingа. Аналогичное представление сделано де Бройлем для материальных частиц. В любом случае, я не верю, что это представление может быть развито удовлетворительным образом» [219, с. 365].

На стороне де Бройля выступил Л. Бриллюэн, хорошо знакомый с его теорией: «Мне кажется, что нет серьезных 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» [219, с. 365].

В общей дискуссии после всех докладов выступил Эйнштейн. Он предложил мысленный эксперимент прохождения электрона через отверстие в экране. В этом случае его волна дифрагирует и принимает вид сферического пузыря. Эйнштейн задается вопросом: «Теория говорит, что электрон можно обнаружить в какой-либо точке на поверхности пузыря, но не говорит, в какой именно; однако, если я наблюдаю его в какой-либо точке волны, то его нет в каком-либо другом месте. Что изменяется в других точках? Как электрон знает об этом? Теория об этом ничего не говорит» [219, с. 440]. Главное возражение заключалось в том, что в тот момент, когда электрон регистрируется в одной из точек, его присутствие в других становится запрещенным. Для этого необходим мгновенный сигнал, движущийся с бесконечно большой скоростью к поверхности волны, что противоречит теории относительности. Эйнштейн одобрил попытку де Бройля приписать корпускуле некоторое место в волне в форме ее сингулярности, несмотря на все трудности такого подхода: «По моему мнению, можно отбросить это возражение следующим способом, который не описывает процесс исключительно только волной Шредингера, а, в то же самое время локализует частицу в процессе распространения волны. Я думаю, что де Бройль прав, ведя поиск в этом направлении» [Там же, с. 441].

М. Планк писал после выступления де Бройля на конгрессе: «Осенью 1927 г. я лично познакомился с г-ном де Бройлем на Пятом Сольвеевском конгрессе и был восхищен его скромностью и образованностью» [148, с. 10].

#### **5.4. Значение и затруднения теории двойного решения**

Для дальнейшего анализа статьи де Бройля «Волновая механика и структура...» важно представлять в качестве исходного момента его модель частицы как сингулярности в трехмерной волне и, в которой движение индивидуальной частицы, так же как и ансамбля частиц,

определяется непрерывной волновой функцией  $\Psi$ . Результатом решения де Бройля явилось уравнение первого порядка, основанное на законе скоростей, в котором нашли объединение принципы Мопертюи и Ферма

$$m_i \vec{v}_i = \vec{\nabla} \psi.$$

В конце статьи де Бройль признает, что его сингулярная модель частиц может быть ошибочной и что результат, который он получил, формулы для скорости и плотности вероятности в терминах  $\Psi$  могут быть постулированы: «постулируем, что движение точки определяется как функция фазы волны» [с. 248]. Теория непрерывной волны, управляющей движением частицы, является вынужденной мерой, де Бройль называет ее «предварительной позицией». С исторической точки зрения значение статьи «Волновая механика и структура...» связывается со значимостью, приписываемой предварительной теории волны-пилота. Сингулярные и волны играют для де Бройля роль аналогичную материальным уравнениям в теории Максвелла. В обоих случаях имеет место некий концептуальный каркас для построения новой теории. После получения результата эти «строительные леса» могут быть отброшены. Де Бройль настаивал, что в развитии направления, которое он выбрал, теория волны-пилота должна рассматриваться как предварительная. В истории науки встречаются аналогичные ситуации, когда абстрагирование от деталей модели, основанной на более ранней теории, приводит к новой полноправной теории, включающей новые концепции.

Неоднократно в своих воспоминаниях де Бройль обращался к принятому им решению оставить работу над теорией двойного решения. «Я вернулся в Париж очень взволнованный и, размышляя по этому поводу, пришел к убеждению, что ... теория волны-пилота не пригодна. Не осмеливаясь вернуться к теории двойного решения из-за математических трудностей, я пал духом и примкнул к вероятностной интерпретации Бора и Гейзенберга», - цитирует де Бройля Лошак [104, с. 100].

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  $\phi$  не является независимым от определения функции  $a$ . Поэтому в уравнении

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

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 сопряженной

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 отраженном пучке равна нулю, а, значит, отраженный 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» [22, с. 115].

Еще 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  $\partial\phi/\partial t$  и  $-\text{grad}\phi$ , и они изменяются сложным образом с течением времени, и, заключает де Бройль, «полученное движение частицы очень мало правдоподобно» [Там же].

Рассматривая фотоны как вполне локализованные точки с помощью теории волны-пилота, де Бройль приходит к новому затруднению - скорость фотонов в темных полосах интерференции при отражении от несовершенного зеркала будет больше скорости  $c$ . «Было бы соблазнительно изобразить фотоны как вполне локализованные точки, описывающие траектории вероятности... если мы хотим связать с фотонами движение вероятности, то нужно придать им в темных полосах скорость, большую  $c$ , что будет трудно совместить с теорией относительности» [22, с. 125]. И в заключении де Бройль пишет, что волна не является физическим явлением в старом смысле этого слова. Она выражает символическое представление вероятности.

Была ли на Сольвеевском конгрессе вскрыта несостоятельность взглядов де Бройля? – такой вопрос ставит в своей статье С.Ф. Шушурин [193]. Если такой вопрос ставить по отношению теории волны-пилота, то, как показано в выступлении Паули, волны вероятности не могут направлять движение частицы так же, как частица не может быть встроена в волну вероятности. К теории двойного решения эти аргументы не относятся, и единственной трудностью на пути ее дальнейшего развития встали математические затруднения, это осознавал сам де Бройль.

Вопрос «Почему теория де Бройля была отклонена?» рассматривается в статье Бонка [224], который постарался понять быструю победу и принятие копенгагенской интерпретации. Так же, как и Күшинг [258], Бонк предполагает, что это не было определенной истори-

ческой случайностью, и теория де Бройля могла иметь успех в 1927 г. и признание приоритетной интерпретации квантовой механики. Трудно оценить, насколько реалистичен такой альтернативный исторический сценарий.

### **5.5. Эволюция детерминизма в работах Л. де Бройля**

В своем анализе истории квантовой теории В.С. Степин пишет, что «дебройлевская картина мира была «последней из могикан» наглядного применения квазиклассических представлений к картине физической реальности» [158, с. 16]. Степин отмечает, что попытки Шредингера развить эту картину с помощью представления частиц волновыми пакетами в реальном трехмерном пространстве не имели успехов, т.к. вызывали неразрешимые проблемы устойчивости и редукции волнового пакета [Там же]. М. Борн предложил статистическую интерпретацию волновой функции, после чего волны, пакет которых должен представлять частицу, приобрели смысл «волн вероятности».

Представления Л. де Бройля о специфике атомных процессов сыграли огромную роль на начальных этапах развития квантовой механики. Де Бройль, введя наглядное представление о микрочастицах как о частицах, неразрывно связанных с волнами материи, обосновал естественность аналогии между описанием фотонов и описанием электронов. Но дальнейшие попытки создать наглядную картину мира закончились неудачами. Образ корпускулы и образ волны, необходимые для характеристики микрообъекта, выступают как дополняющие друг друга, но несовместимы в рамках одного наглядного представления. В квантовой физике создавалась новая картина мира. В разработке ее выдающуюся роль сыграл Н. Бор, подход которого «заключался не в выдвижении гипотетических представлений об устройстве природы, на основе которых можно было бы формировать новые конкретные теоретические гипотезы, проверяемые опытом, а в анализе схемы измерения, посредством которой может быть выявлена соответствующая структура природы» [158, с. 16]. Бор одним из первых сформулировал принцип квантово-механического измерения, который включает описание существенных взаимодействий между атомными объектами и приборами [10]. Дуализм Бора (частица или волна, и никогда вместе) принципиально отличался от дуализма де Бройля (частица плюс волна, всегда вместе).

В своей работе Джеммер писал, что копенгагенская интерпретация для большинства физиков является единственной принятой интерпретацией квантовой механики, а поиски последовательной теории атома, начатые на Первом Сольвеевском конгрессе в 1911 г., были успешно завершены на Пятом Сольвеевском конгрессе 1927 г. принятием копенгагенской интерпретации квантовой механики. В конце XX века этот вывод уже не являлся столь однозначным. Квантовая меха-

ника, ее методологические основы широко обсуждаются в научной литературе до сих пор [108, 112]. Теория волны-пилота, порожденная де Бройлем в 1927 г. и детально разработанная Д. Бомом спустя 25 лет в 1952 г., теперь принята как альтернативная формулировка квантовой механики. Многочисленные интерпретации квантовой механики, существующие на сегодняшний день, обсуждаются в работах [51, 296, 311, 312, 314]. Продолжает также обсуждаться и вопрос об онтологическом статусе фундаментальных понятий и представлений в новой картине мира, появившейся после открытия квантовой механики, например, в [142].

В пятидесятые годы XX века Луи де Бройль вновь возвращается к поиску другой интерпретации, более близкой к идеалу классической физики: «Интерпретация Бора и Гейзенberга не только сводит всю физику к вероятности, но и дает этому понятию совсем новый научный смысл. В то время как великие умы классической эпохи, начиная от Лапласа и кончая 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» [21, с. 105].

Пуанкаре, который оказал огромное влияние на формирование мировоззрения де Бройля, писал: «недетерминистичность науки не может существовать, а мир, в котором не царит детерминизм, был бы закрыт для ученых. И когда задают вопрос о том, каковы пределы детерминизма, то это равнозначно вопросу, как далеко может простираться область науки и где находятся границы, за пределами которых она бессильна» [131, с. 632]. Де Бройль задавал вопросы – Останется ли квантовая механика индетерминистской? [21]. И пытался найти ответ, развивая теорию двойного решения.

Обратившись к переосмыслению волновой механики, де Бройль не смог дать сколько-нибудь завершенной математической картины рассматриваемых вопросов, но, как отмечает Г.А. Зайцев в своей рецензии на книгу де Бройля «Переосмысление волновой механики», написанную совместно со своим учеником Андраде э Сильва, де Бройль привел «ряд доводов, делающих точку зрения на основы квантовой теории, когда первично детерминистическое описание, более убедительной» [61, с. 54]. Эта книга является итогом переистолкования стандартной квантовой механики, попыткой де Бройля выйти за рамки индетерминизма. Де Бройль излагает основы теории двойного решения в релятивистском и нерелятивистском случае, рассматривает дополнения к этой теории, которые он развил в более поздних работах.

Де Бройль задает 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 устраниć смущающие возражения Эйнштейна и Шредингера, 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 остается «реалистом», и на это у него имеются серьезные причины: субъективистские интерпретации будут всегда вызывать у него болезненные впечатления», - пишет де Бройль в статье, объясняющей его возвращение к детерминистической интерпретации [21, с. 106]. При этом он снова обращается к истории наук, к тем периодам науки, когда определенные концепции, рассматриваемые в виде догмы, оказывали тираническое влияние на прогресс науки, и призывает периодически подвергать глубокому исследованию принципы, которые стали принимать без обсуждения.

В конце своей научной жизни Луи де Бройль сделал набросок программы, в которой он видел завершение своих идей и направление своей мысли, в книге «Термодинамика изолированной частицы», изданной в 1964 г. Первоначальная идея де Бройля состояла в объединении экстремальных принципов Мопертюи и Ферма, при котором оптические лучи отождествляются с траекториями классической механики. Новая идея де Бройля состояла в объединении трех 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, заключенной 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 определенный путь развития», - на это обратил свое внимание де Бройль еще в 1936 г. [16]. Об этой попытке Л. де Бройля, не получившей завершения, писал его ученик Ж. Лошак: «Если принять сторону волн, сохраняя принцип максимума эн-

тропии, 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» [102, с. 105].

Выступление Л. де Бройля на Сольвеевском конгрессе в 1927 г. вызвало интерес и рассматривалось ведущими физиками того времени наравне с докладами М. Борна и В. Гейзенберга «Квантовая механика» и Э. Шредингера «Волновая механика». Вопросы, которые возникли в ходе дискуссии, требовали дальнейшего развития теории. В своей работе Кушинг [258], рассматривая результаты Пятого Сольвеевского конгресса с точки зрения победы Копенгагенской школы, задается вопросом, почему не были услышаны возражения Эйнштейна, де Бройля, Шредингера против вероятностной трактовки. После знакомства с материалами конгресса закономерно встает вопрос: почему де Бройль оставил свою теорию? Позднее на этот вопрос он ответил сам: «ее развитие было связано с математическими трудностями, которые мне казались непреодолимыми» [1, с. 356].

Теория волны-пилота, развитая де Бройлем в 1927 г., была завершающей точкой в эволюции идеи корпускулярно-волнового дуализма де Бройля, начало которой относится к 1923 г. Паули в дискуссии после доклада де Бройля подчеркнул центральную идею де Бройля: «Я хотел бы сделать небольшой комментарий к тому, что, по моему мнению, является математическим базисом точки зрения мистера де Бройля, касающейся движения частиц по определенным траекториям. Его концепция основана на принципе сохранения заряда... если в теории поля существует принцип сохранения заряда... это всегда приводит к формальной возможности ввести вектор скорости ... и представить кроме того частицы, которые бы двигались, следуя линиям этого вектора» [219, с. 365].

Лошак, анализируя ситуацию, сложившуюся на Пятом Сольвеевском конгрессе, писал, что там образовались два лагеря. «Первый лагерь состоял из людей, которым был присущ оптимизм молодости, и они познали успех, группируясь вокруг авторитетных мэтров Бора и Борна, а выдающимися представителями этой единой группы были Гейзенберг, Паули и Дирак... им не противостоял никакой подлинный лагерь, а лишь разрозненные учёные, которые были, конечно, выдающимися и ориентировались на некий идеал, но у них не было никакого общего проекта и никаких опорных пунктов для того, чтобы высказывать сомнения, демонстрировать неповиновение или выдвигать

альтернативные проекты» [103, с. 166]. Глубокие противоречия двух точек зрения не были преодолены на этом конгрессе, историко-научные исследования этого вопроса можно найти в многочисленных работах [219, 257, 263, 272, 281, 292, 304, 313, 317].

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 [169]. 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. Классический детерминизм предполагает, что можно изучать физические системы так, как если бы они были изолированными, или их взаимодействие с остальной вселенной могло бы быть точно определено. Это приближение может приобретать строгий смысл только для макроскопических систем. На микроуровне такие представления невозможны. Случайный фотон, проходящий вблизи микросистемы, неправильная структура поверхности, тепловое возбуждение тел, рассматриваемых как инертные объекты, – все эти примеры возмущений нарушают стройность теоретических представлений независимо от того, основаны ли они на детерминизме или понятии вероятности. Де Бройля не устраивало положение, что волновая механика, в основе которой лежала его мысль о существовании 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.

Обсуждение проблем, связанных с теорией двойного решения, имело свое продолжение в 50-е годы XX века в переписке между де Бройлем и Паули. В архиве де Бройля хранятся три письма, написанные Паули к де Бройлю в период с февраля 1952 г. по июль 1953 г. Паули обращается к де Бройлю на английском языке: «Целью настоящего письма является обсуждение различных научных вопросов в связи с Вашей старой идеей «волны-пилота» (*onde pilote*), которую мы с Вами уже обсуждали на Сольвеевском конгрессе в 1927 г. Я всегда вспоминаю с величайшим удовольствием эти старые дни, и призываю Вас проявить такое же терпение и доброжелательность ко мне, какие я был рад проявить к Вам». Паули указывает на затруднения решения и предлагает свои пути. В марте 1952 г., по-видимому (Паули пишет, что «предвкушает встречу, на которой надеюсь обсудить фундаментальные проблемы, касающиеся концепции вероятности»), состоялась встреча Паули и де Бройля в Париже. В последнем письме к де Бройлю в 1953 г. Паули завершает начатое год назад обсуждение

теории двойного решения, он пишет: «Эта теория сегодня еще только программа. Вы не можете указать дифференциальные уравнения, решения которых должны иметь фазы, согласовывающиеся с решениями дифференциального уравнения Шредингера».

Поиск Л. де Бройлем физического смысла существования волн и частиц представляет определенный интерес как для историков науки, так и для исследователей различных интерпретаций квантовой механики. Еще одну сторону теории волны-пилота де Бройля указал в своей книге А. Садбери: «Важность рассматриваемой теории состоит вовсе не в том, что она может действительно рассматриваться как серьезный 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» [138, с. 272].

Значение теории двойного решения подчеркнул и Ж. Лошак: «Конечно, теория двойного решения наталкивалась на трудности, но она заслуживала (и заслуживает) уважения 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 приведет к новым результатам. Плодотворные физические образы слишком редки, чтобы быть попросту отброшенными» [104, с. 93].

В мировой литературе в настоящее время широко обсуждаются вопросы интерпретации квантовой теории. В частности, в обзорной статье М.Б. Менского «Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов» [108] среди различных интерпретаций рассматривается возможность интерпретации даже функции сознания в терминах квантовых измерений. Менский пишет, что квантовая механика давно стала рабочим инструментом в самых разных областях физики, «однако концептуальные вопросы, которые были поставлены еще в пору ее создания, до сих пор нельзя считать решенными» [Там же, с. 632]. Старые вопросы получают новые формулировки, ставятся специальные эксперименты, и в ходе обсуждения возникают новые приложения квантовой механики.

## **ГЛАВА 6. ВКЛАД Л. ДЕ БРОЙЛЯ В ПРЕПОДАВАНИЕ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ**

### **6.1. Преподавание в Институте Анри Пуанкаре**

После активного участия в создании квантовой механики в жизни Л. де Бройля наступил период, связанный с преподавательской деятельностью, созданием французской школы теоретической физики, исполнением обязанностей непременного секретаря Французской академии наук. Начало педагогической деятельности про-

фессора де Бройля совпало со становлением и развитием Института Анри Пуанкаре.

Институт Анри Пуанкаре (ИАП) был создан в 1928 г. и огромную роль в его учреждении сыграл один из наиболее известных французских математиков XX века Эмиль Борель [130]. История создания ИАП описана Борелем в статье к шестидесятилетию Л. де Бройля [291, с. 438-443]. Началась она с переговоров, которые вел представитель Фонда Рокфеллера, известный американский математик Д. Биркхофф (G.D. Birkhoff), ученик А. Пуанкаре, с целью передачи значительной суммы денег Парижскому университету (100 тыс. долларов было выделено на строительство здания, еще 180 тыс. предназначались для развития). Обязательным условием было частичное пожертвование французских частных лиц, и таким меценатом выступил барон Ротшильд. Борель в то время возглавлял в Сорбонне кафедру, которая называлась «Расчет вероятностей и математическая физика». Де Бройль писал: «Обладая известной широтой взглядов, Борель ясно видел, что Франция не занимает больше в теоретической физике того места, которое она должна занимать, и он с недюжинным упорством добивался создания нового института» [243, с. 37]. ИАП стал новым институтом Факультета естественных наук Парижского университета, и был призван решить две задачи: преподавания и научных исследований в области теоретической физики и теории вероятностей.

Именно Борель предложил Л. де Бройлю занять должность профессора в этом институте, об этом событии де Бройль писал: «1928 г. был поворотным в моей жизни, потому что я начал преподавать в высшем учебном заведении» [Там же, с. 38]. В 1928 г. де Бройль прекратил работу по развитию теории двойного решения, присоединился к копенгагенской интерпретации квантовой механики, и приступил к углублению понятий и представлений новой механики. За долгие годы преподавания он прочитал многочисленные курсы лекций по релятивистской и нерелятивистской квантовой механике.



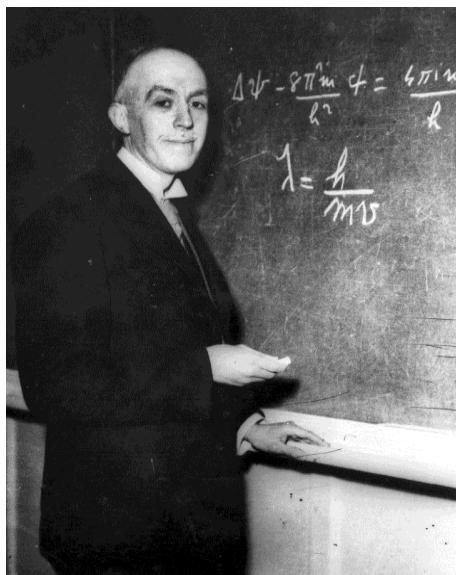
Институт Анри Пуанкаре, фото 1939 г.

В интервью, которое Л. де Бройль дал Ф. Кубли в 1968 г., он вспоминал о начале своей педагогической деятельности: «В 1928 г. меня номинировали профессором Сорбонны. Я никогда не преподавал до этого, лишь читал свободные лекции. Я принял излагать работы Шредингера, Дирака и других. Понемногу я перестал идти своим тем путем, на котором я был до этого момента» [285, с. 115]. В этих словах содержится частично ответ на вопрос, почему де Бройль оставил развитие своей теории двойного решения. Для того чтобы излагать студентам фундаментальные положения квантовой механики, де Бройль углублялся в ее основные положения, такие как принцип неопределенности, общую теорию преобразований, теорию магнитного электрона. Впоследствии все эти курсы лекций были изданы в виде монографий, и широко известны физикам всего мира. Луи де Бройль писал: «В моих лекциях рассматривались почти все разделы волновой механики и ее приложений. Я заставил себя изложить эти лекции в письменном виде, и почти все опубликовал» [Там же]. По воспоминаниям одного из слушателей лекций де Бройля «это были великолепные лекции по теориям Гейзенберга, Дирака, Паули, по ядерной физике и радиоактивности» [291, с. 6]. Преподавание теоретической физики вместе с де Бройлем в ИАП осуществлял и Л. Бриллюэн. Де Бройль писал: «В то время, как Л. Бриллюэн оставил за собой исследования квантовых статистик и их применений, я посвятил себя преподаванию волновой механики и теорий, с ней связанных» [284, с. 38].

Пост профессора Парижского университета де Бройль занимал с 1928 г. до 1962 г. (он покинул университет, когда ему исполнилось 70 лет). Осенью 1928 г. он впервые приступил к чтению лекций, а с 1933 г. Луи де Бройль стал руководить кафедрой теоретической физики в ИАП. По словам Бореля именно «де Бройль сделал из ИАП один из наиболее важных исследовательских центров в теоретической физике и в других, связанных с ней областях, он воспитал многочисленных учеников» [291, с. 439]. А. Жорж писал, что де Бройль «любил свои университетские обязанности, несмотря на их огромную поглощающую способность, потому что он мог воздействовать на учеников, образовывать их умы и руководить их исследованиями» [Там же, с. 453]. О своем посещении в 1956 г. ИАП и о встрече с де Бройлем написал Д.Д. Иваненко: «Институт имени Анри Пуанкаре, расположенный в одной усадьбе с Радиевым институтом, является своеобразным научным учреждением по теоретической физике и математике типа научно-исследовательского института наших университетов. Здесь ведется научная работа и читаются регулярно спецкурсы на весьма высоком уровне Л. де Бройлем, рядом профессоров, в том числе и иностранных. В 1957 г. циклы лекций читали Швингер (элементарные частицы), Янг (закон симметрии), Шифф» [63, с. 337].

В течение 33 лет де Бройль был блестящим лектором, добросовестно относящимся к своему делу. Он имел высокие представления о своих обязанностях преподавателя. Эти представления Луи де Бройль неоднократно излагал в своих статьях [14, 239], размышляя о противоположности между позицией исследователя, который в силу своего ума занят открытием еще неизвестного, и позицией преподавателя, который, обучая тому, что знает, следует программе, установленной для него извне или составленной им для себя, поддается догматизму. «Исследование непременно предполагает вечное беспокойство, преподавание стремится к установлению невозмутимой уверенности, которая противопоставляется беспокойству» - таковы мысли де Бройля, который сам в душе оставался исследователем, беспокойным и сомневающимся, а внешне выглядел Мэтром, который уверен в себе и в том, что он утверждает.

Несмотря на такое различие, действительность показывает, что исследование и преподавание в высшей школе всегда связаны друг с другом. «Исследование и преподавание почти неотделимы друг от друга и чаще всего страдают от взаимной разобщенности. Исследование питает преподавание, а преподавание, необходимое для того, чтобы факел науки переходил от предыдущего поколения к следующему, укрепляет исследование» - писал Луи де Бройль [14, с. 344].



Профессор Л.де Бройль.  
Фотография предоставлена Фондом Луи де Бройля, г. Париж

Де Бройль обращал внимание на методику преподавания физики в университете образовании: наблюдается «инерция» преподавания по отношению к сегодняшнему прогрессу, преподавание науки опаздывает всегда за своим современным состоянием [147]. С появлением квантовой механики произошла интеллектуальная революция, которая принесла новые представления, и затронула важные фило-

софские аспекты. «Классическая физика, как старые земли, где можно почти не опасаться землетрясений и вулканической деятельности, находится в укрытии от слишком больших изменений» - писал Л. де Бройль [239]. Ум молодого человека, приступающего к изучению физики, считал де Бройль, как эмбрион живого существа, который последовательно проходит эволюцию вида, к которому он принадлежит, и также должен повторить историю человеческого ума. «Современные теории трудны, более мятежны в нашем сознании, нежели классические концепции, а у учеников, находящихся в стадии получения высшего образования, нет еще достаточной зрелости ума, чтобы различить процесс изучения предмета и изложение теорий с неясными понятиями». Поэтому он оставил изложение спорных и трудных деталей, связанных, например, с поисками физического смысла корпускулярно-волнового дуализма.

Слушатели его лекций отмечали, что как лектор де Бройль отличался педантичностью, никогда не опаздывал, приходил с пачкой рукописно исписанных листов и читал текст высоким и монотонным тоном, и переписывал все с этих листов на доску, вплоть до формулы длины волны собственного имени. По окончании лекции он сразу покидал аудиторию, и если кто-то хотел задать вопрос, то де Бройль назначал встречу, на которой он объяснял все трудности [4, 104]. Всегда встает вопрос, когда речь идет о великом ученом, каким он был преподавателем. Был ли де Бройль хорошим преподавателем? Ж. Лошак пишет: «Возможно нет... Де Бройль вел повествование, словно затерявшись во внутреннем мире, не глядя на аудиторию и, казалось, совсем не интересуясь ее реакцией. Однако де Бройль был больше, чем хороший преподаватель, это был Мэтр ...можно было удивляться силе его разума, ясности объяснений и глубине замечаний» [104, с. 143]. Назвать мэтром можно не любого преподавателя, здесь огромную роль играет его активное занятие наукой, знание проблем, о которых он рассказывает на лекциях, изнутри, а не просто констатация событий и фактов.

Де Бройль писал: «В моих лекциях рассматривались почти все разделы волновой механики и ее приложений... Подготовка моих курсов лекций привела меня к необходимости углубления целого ряда вопросов, связанных с определением первых интегралов, средних значений, с частотой и фазовой скоростью в волновой механике, с теорией электрона, разработанной Дираком, с теоремой Кенига, с принципом инертности энергии» [14, с. 358]. Например, курс 1929-1930 гг. назывался «Теория квантования в новой механике», далее следовал курс «Введение в волновую механику», который был издан в 1930 г. Курс, опубликованный в 1938 г., назывался «Принцип соответствия Нильса Бора и взаимодействия между веществом и излуче-

нием». Один из лучших учебников по релятивистской квантовой механике – «Магнитный электрон» был написан в 1934 г., после того как курс лекций по теории электронов Дирака был прочитан Л. де Бройлем в ИАП. Эта книга стала первым учебником по теории Дирака и, несмотря на то, что позже появились другие похожие книги, «Магнитный электрон» де Бройля пользовался громадной популярностью среди читателей во всем мире. Ю.П. Рыбаков, редактировавший перевод «Магнитного электрона», отмечал, что блестящий литературный язык, подробное (с многочисленными выкладками) изложение предмета, выяснение физического смысла вводимых понятий и эффектов составляет несомненные достоинства книги де Бройля [29, с. 325].



*Вручение награды Л.де Бройлю, май 1939 г.*

*Справа от де Бройля Э. Борель, Ж. Перрен, Ф. Жолио-Кюри, И. Жолио-Кюри  
(подписи сделаны рукой Л.де Бройля)*

Книга «Новая физика и кванты», изданная в 1936 г., которая в английском переводе называется «Революция в физике», представляет собой уникальный пример изложения квантовой механики без единой формулы [16]. В ней де Бройль рассматривает теорию атома Бора, идеи, которые привели его самого к созданию волновой механики, описывает волновую механику Шредингера и квантовую механику Гейзенberга, показывая их тождество. В этой книге можно найти изложение релятивистской теории Дирака с учетом принципа Паули, а также краткое, но раскрывающее самую суть, изложение основ теории относительности. В предисловии редактора русского перевода этой книги написано, что это «образец лучшего стиля популярной литературы, где автор никогда не впадает в дурной тон снисходительного отношения к читателю».

Во всех книгах, написанных де Брайлем по тем или иным вопросам квантовой механики, отмечается оригинальный подход, который связан с умением выявить классические аналогии, подчеркнуть характерные черты математического аппарата квантовой механики. Эти курсы лекций де Брайля и сегодня являются одними из лучших учебников по волновой механике, квантовой электродинамике, волновой и корпускулярной оптике, физике рентгеновских лучей. Библиография научных работ Л. де Брайля приведена в прил. 4. Во всех этих работах де Брайля нашли отражение его размышления о сущности, источниках и путях развития научного познания, о типах научных теорий, о влиянии различных философских течений на познавательную деятельность. Ясное «критическое и философское мышление», присущее книгам де Брайля, подчеркивал и ценил Эйнштейн [211, с. 349].

Близкий друг де Брайля, бывший его ученик, ставший известным редактором, в том числе и серии книг о научных открытиях, Андре Жорж писал: «Его преподавание всегда было оригинальным как по манерам, так и почти всегда по темам. В его курсах всегда присутствуют чувство композиции, пропорций, уверенность, с которой он проводит свою мысль. Я очень часто восхищался этой тайной архитектурой, я слышал не только логический порядок, но и видел присущее ему мастерство, с которым он точно выстраивал годичный курс, каждую лекцию, как если бы совсем естественно пришло время разбить на кадры выражение своей мысли, а не наоборот» [291, с. 452].

## **6.2. Семинар в Институте Анри Пуанкаре и создание научной школы**

Вместе с преподавательской деятельностью Л. де Брайль приступил к созданию научного семинара, на котором рассматривались научные работы его учеников - бывших студентов, а также выступали с докладами и уже известные физики. О периоде становления семинара де Брайль писал: «С началом моей преподавательской деятельности мое одиночество окончилось не сразу... Мои лекции посещались немногими, и не каждый год кто-нибудь из моих учеников защищал диссертацию. Когда я в 1931 г. организовал семинар, то сначала у меня было лишь трое учеников, и у нас установились действительно дружеские отношения» [14, с. 282].

О научной школе Луи де Брайля не столь широко известно, сведения о его семинаре можно получить из воспоминаний и интервью одного из последних учеников де Брайля Ж. Лошака [104, 152, 153]. Исследований, посвященных вопросам создания и развития научной школы де Брайля, ее роли в научной жизни Франции, на сегодняшний день неизвестно. Почему с одним ученым справедливо связывается целая школа, в то время как у другого, не уступающего ему по таланту, такой школы нет? Задать такой вопрос значительно легче, чем на-

него ответить. Почему у Эйнштейна и Шредингера практически не было учеников, а Бор создал и возглавил уникальную копенгагенскую школу, Борн – геттингенскую, Зоммерфельд – мюнхенскую? Прямого ответа на этот вопрос не существует. В своем исследовании такого явления как научные школы в физике Ю.А. Храмов писал, что не каждый, даже выдающийся ученый, может создать научную школу. «Это объясняется, исключительно, их некоторыми личными качествами, например, замкнутостью или «углублением в самих себя». К таким ученым можно отнести, например, А. Эйнштейна, М. Планка, П. Дирака и др.» [185, с. 9]. Другие, не менее выдающиеся ученые, например, Н. Бор, М. Борн, Л.Д. Ландау, умели сплотить вокруг себя талантливых молодых физиков, возглавить коллектив, нацеленный на решение важных проблем. Храмов пишет, что перед историками науки научная школа предстает как особый объект, выражющий сложный спектр социально творческих связей между представляющими ее учеными.

Про Луи де Бройля нельзя сказать, что он возглавил научную школу, похожую на школы Бора, Борна или Зоммерфельда. Но то, что он имел учеников, которые следовали по его стопам, развивали его идеи и шли дальше, чем учитель, - исторический факт. В 1991 г. в Анналах Фонда Луи де Бройля был опубликован список из 241 докторской работы, в которых де Бройль был либо руководителем, либо председателем экзаменационной комиссии. Лошак писал: «Те, кто в этом списке фигурируют, вспомнят о серьезности, с которой он вел эту деятельность.... Он читал все очень тщательно, делал замечания по содержанию и форме, проверял многочисленные расчеты, убеждался в однородности физических величин и связанности обозначений, и скромно отмечал орфографические ошибки. Но он мало комментировал рукописи. Чаще всего простая маленькая вертикальная черта на полях указывала идею или результат, который его заинтересовал; вопросительный знак обычно не означал вопрос, который надо задавать, но несогласие, как в комментариях шахмат (игре, которой он увлекался в своей молодости). Если у него были замечания, он их делал устно, предварительно записав на отдельном листе, который он вручал автору докторской. После этого, его поведение немного напоминало поведение дирижеров, которые, кажется, ничего не делают на концерте, так как они обо всем сказали на репетиции. Он держался практически спокойно во время защиты, и не произносил ничего вне обычных фраз, которые на него возлагались в начале и в конце, и которые он произносил, немного бормоча: вспомним о его застенчивости» [296]. Лошак писал, что де Бройль не давал своим ученикам тем докторских. Это было его правило: если молодой исследователь не может выбрать тему докторской, то он не в состоянии ее и написать. После того, как выбор темы был сделан, де Бройль направлял исследо-

дование, и помогал своему ученику в процессе работы над диссертацией [103, с. 209].

Л. де Бройль был лидером французской теоретической школы в силу того, что имел высокие личные результаты, совершив открытие, которое имело огромное значение как для понимания физической картины мира, так и для становления новой области теоретической физики. Он обладал такими необходимыми качествами лидера, как оригинальность идей и мышления в целом, широта и разносторонность интересов, целеустремленность, работоспособность. Важную роль в развитии и становлении научного направления играет не только работа под руководством лидера, но и передача знаний, методологических приемов, стиля работы от лидера к его последователям. Де Бройль умел ярко и доступно излагать свои мысли и ему, несомненно, было присуще педагогическое мастерство лидера. Храмов, анализируя качества научного лидера, выделяет, прежде всего, его талант, но не меньшее значение имеют высокая культура, разносторонность знаний, доброжелательность. Об этих качествах, присущих де Бройлю, можно прочитать в воспоминаниях людей, хорошо знавших его, например, Ж. Лошака, А. Жоржа [104, 229].

Вначале в семинаре де Бройля в ИАП участвовали лишь три человека - Андре Жорж (Andre George), Жан Луи Детуш (J.L. Dertouches) и Клод Маньян. Вскоре к ним присоединились М.-А. Тоннелла, а также Жерар Петье, Оливье Коста де Боргард и многие другие. В предисловии к своей книге «Волновая механика фотона. Новая теория света», написанной в 1938 г., Л. де Бройль благодарит своих «молодых сотрудников из Института Анри Пуанкаре, и, в частности, Жана-Луи Детуша, Жака Винтера и Жерара Петье, которые помогли мне уточнить некоторые положения волновой механики фотона» [246]. Портреты первых учеников де Бройля, атмосферу, царившую на семинаре, дает Лошак в книге «Принц науки» [104].

Для идентификации научного коллектива как школы характерно наличие особой научной атмосферы, стиля, или научной идеологии. Все эти черты можно найти в научной школе де Бройля. Формой существования ее был семинар, которым на протяжении десятилетий руководил де Бройль. Семинар был еженедельным, на котором молодые и не очень молодые физики-теоретики излагали свои взгляды. Здесь не было принято прерывать докладчика и задавать вопросы до конца семинара. Дискуссии были в конце, и протекали без эмоций и страстей. На семинаре выступали также великие физики XX века, среди которых были Борн, Блох, Бриллюэн, Дарвин, Дирак, Эйнштейн, Эльзассер, Ферми, Фаулер, Гамов, Гейзенберг, Мотт, Паули... [151, 152]. Ж. Лошак пишет, что семинар в течение десятилетий являлся важнейшим мероприятием для французских теоретиков, стремивших-

ся быть в курсе последних исследований. На семинаре докладывали обо всех теоретических работах, которые велись в разных научных центрах во Франции. Через двадцать лет де Бройль вспоминал по поводу работы семинара, что «теперь в его работе принимает участие до полусотни участников, и некоторым из них иногда приходится стоять, так как не хватает мест» [14, с. 283].

О своих впечатлениях во время посещения семинара де Бройля писал Б.Г. Кузнецов [89, 90]. Кузнецов вспоминал о выступлении И.Е. Тамма в 1962 г. на семинаре де Бройля [91]: «Игорю Евгеньевичу предстояло выступить с сообщением о его идеях квантованного импульсного пространства на семинаре Луи де Бройля ... На семинаре он говорил по-английски, а переводил его Вижье. Я сидел рядом с моим старым другом Марией-Антуанетой Тоннела и наблюдал реакцию участников семинара. Интерес к идеям Игоря Евгеньевича был общим, и столь же общим было восхищение обаятельной манерой докладчика. После доклада происходила краткая дискуссия между ним и сторонниками версии, выдвинутой де Бройлем, Бомом и Вижье. Игорь Евгеньевич, как и большинство современных физиков, был против этой версии, но меня заинтересовала не коллизия идей, а манера спора, удивительная терпимость».

Мария-Антуанет Тоннела (Marie-Antoinette Tonnellat (1912-1980)) – окончила естественнонаучный факультет Сорбонны, сначала слушала лекции Луи де Бройля, а затем под его руководством в 1940 году защитила докторскую диссертацию. Тоннела известна своими работами как в теоретической физике, так и в истории и философии науки. Широкую известность ей принесли работы в области теории относительности и теории гравитации (в 1946 г. она работала в Дублине, со Шрёдингером, над теорией единого поля Эйнштейна-Шрёдингера), ее книга «Основы электромагнетизма и теории относительности» была переведена и издана на многих языках, в том числе и на русском языке [161]. Тоннела исследовала вопросы гравитационного поля с помощью частиц - гравитонов и разрабатывала квантовую теорию гравитона как частицы с максимальным спином 2. В это же время Луи де Бройль развивал квантовую теорию света, и рассматривал фотон как составную частицу [247]. В продолжение этих работ совместно с Тоннела в 1950 г. у него вышла статья в Докладах академии наук «О возможности сложной структуры для частиц со спином, равным 1» [прил. 3].

Еще один знаменитый физик-теоретик Александру Прока (A. Proca, 1897-1955) начинал свою научную деятельность под руководством Л. де Бройля. В 1933 г. он защитил докторскую диссертацию «Релятивистская теория электрона», а в 1936 г. сформулировал волновое уравнение для частиц со спином 1 и массой, не равной нулю, которое получило название уравнение Прока.



*Члены семинара де Бройля во дворе Института А. Пуанкаре, 1939 г.*

*Крайний слева – Л. де Бройль, в центре М.-А. Тоннела,  
справа от нее – А. Прока, крайний справа – А. Кастлер*

Вместе с молодыми учениками в 1950-е годы Луи де Бройль приступил к разработке проблемы движения сингулярностей, являющихся решениями нелинейных уравнений. В эти годы им была разработана новая квантовая теория измерений, построены динамика частицы с переменной собственной массой и релятивистская термодинамика. А также были сформулированы идеи скрытой термодинамики изолированной частицы (Термодинамика изолированной частицы, 1964). «Я в течение двадцати лет с радостью наблюдаю за развитием вокруг себя целой школы и за выполнением ряда работ, зачастую важных, моими нынешними учениками или бывшими учениками, которые в свою очередь сами уже стали учителями» - писал де Бройль [14, с. 283]. Опубликованный список диссертаций, защищенных под руководством Л. де Бройля, позволяет судить о диапазоне проблем, относящихся к современной теоретической физике, к решению которых приступали его ученики. Приведем лишь некоторые темы диссертаций:

1. Л. Гольдштейн «Квантовая теория неупругих столкновений электронов», 1932 г.
2. А. Прока «Релятивистская теория электрона», 1933 г.
3. С. Ватанабе «Вклад в изучение второго начала термодинамики с точки зрения волновой механики», 1935 г.
4. Ф. Лондон «Новая концепция сверхпроводимости», 1937 г.
5. Л. Картан «Перспективы лучевой оптики и ее применения в масс-спектроскопии», 1938 г.
6. М.-А. Тоннела «О теории фотона в Римановом пространстве», 1941 г.

7. О. Коста де Боргард «Вклад в изучение теории электрона Дирака», 1943 г.
8. П. Шансон «Оптические элементы объектива протонного микроскопа», 1946 г.
9. П. Кер «Вклад в изучение и применение чувствительных эмульсий для задач ядерной физики», 1947 г.
10. Ю. Ангел «Поведение ферритов в скрещенных магнитных полях», 1964 г.
11. А. Гессес «Исследования по релятивистской термодинамике», 1967 г.

В число учеников де Брайля кроме французских физиков можно включить многочисленных иностранных ученых, о которых пишет Лошак. Среди них выделяются американский физик Д. Бом и японский Ю. Такабаяши. При непосредственном участии де Брайля (он направлял первые письма в АН СССР с приглашением о стажировке) впервые в 1956 г. был организован обмен французскими и советскими физиками для работы в области теоретической физики. Первым в 1956 г. в СССР был приглашен Ж. Лошак, который работал в течение года в Теоретическом отделе Объединенного института ядерных исследований в Дубне. А в 1957 г. в ИАП приехал Я.П. Терлецкий, в течение года он плодотворно общался с де Брайлем, выступал на его семинаре. Де Брайль представил в журнал «Доклады Французской академии наук» ряд статей Терлецкого, в которых излагались результаты работы того периода. Позже ученик Терлецкого Ю.П. Рыбаков стажировался у де Брайля в ИАП, в результате появилась предложенная Рыбаковым новая интерпретация составляющей фазовой волны в теории двойного решения де Брайля.



*Луи де Брайль в своем кабинете в Академии наук.  
Фотография предоставлена Фондом Луи де Брайля, г. Париж*

В 1973 г. был создан Фонд Луи де Брайля, первым президентом которого стал Нобелевский лауреат Л. Неель. Де Брайль распорядился передать свою Нобелевскую премию, а также дом в пригороде Парижа Фонду для осуществления деятельности, направленной на поддержание работы научного семинара, а также для издания журнала «Анналы Фонда де Брайля». В настоящее время Фонд де Брайля продолжает существовать, издавать журнал, участвовать в издании трудов Л. де Брайля [151, 152].

## **ГЛАВА 7. ВОСПРИЯТИЕ ИДЕЙ Л. ДЕ БРОЙЛЯ В СССР**

### **7.1. Восприятие идей де Брайля и Шредингера мировым научным сообществом и в СССР**

История научной теории, какой является теория корпускулярно-волнового дуализма Л. де Брайля, была бы неполной без картины восприятия этой теории научным сообществом, и особый интерес вызывает ее восприятие национальным научным сообществом, которое говорит о специфике и зрелости национальной науки, степени ее вовлеченности в мировую научную систему. Поскольку идея де Брайля о существовании фазовых волн, связанных с движением микрочастиц, была в очень короткие сроки воплощена Шредингером в уравнение волновой механики, то это явилось подтверждением ее принятия научным сообществом. Как было рассмотрено выше, после защиты диссертации де Брайля 25 ноября 1924 г. (Эйнштейн отозвался о ней в декабре 1924 г.) и публикации Шредингером первой статьи по волновой механике в апреле 1926 г. прошло чуть больше года.

В этот короткий период первая реакция большинства физиков на диссертацию де Брайля была, в основном, скептической. Об этом пишет и П.Л. Капица, который работал в Кембридже. Когда он в 1924 г. приехал к Ланжевену в Париж, то де Брайль доложил основные результаты своей работы в их присутствии. Вернувшись, Капица рассказал о работе де Брайля теоретикам в Кембридже, среди них он упоминает Дирака и Фаулера. «Ни он, ни его товарищи не хотели признать взглядов де Брайля и принимать их всерьез. И когда я предложил поставить доклад на эту тему на семинаре, то мне сказали: «Мы тратить время на это не будем» [67, с. 366].

В письмах Я.И. Френкеля, которые он писал в СССР во время своей стажировки в европейских университетах, например, 11 января 1926 г., можно прочитать: «Наконец, вчера с утра посетил одного молодого французского физика – де Брогля (работами которого весьма интересовался)» [181, с. 153]. В 1926 г. Френкель помимо де Брайля часто встречается с другими французскими физиками: П.Ланжевеном, Ж. Перреном, Л. Бриллюэном. В это время он переводит на немецкий язык второй том своей «Электродинамики». К задаче об электропро-

водности металлов Френкель подошел иначе, чем это делал до него Зоммерфельд. За основу он взял соотношение де Бройля о длине волны, соответствующей движущейся частице. Он применил формулу длины волны де Бройля к электронам, дрейфующим по металлу. При абсолютном нуле температуры минимальная длина волны, соответствующая электронам, находящимся на высшем энергетическом уровне, и обладающим наибольшей скоростью, по порядку величины равна расстоянию между соседними атомами кристаллической решетки металла  $\lambda_{\min} \approx n^{-1/3}$ , где  $n$  - концентрация электронов. Повышение температуры ведет к искажению кристаллической решетки, в том числе и из-за того, что тепловое движение создает на пути электронных волн флуктуации плотности, на которых происходит рассеяние электронных волн. Получалась ситуация, аналогичная рассеянию видимого света на флуктуациях плотности атмосферы. Но, если коэффициент рассеяния видимого света не зависит от температуры, то в металлах он возрастает с ростом температуры. Френкель, используя уравнение Шредингера, получил значение коэффициента рассеяния, которое хорошо согласуется с экспериментом. Он трактует коэффициент рассеяния как величину обратную к длине свободного пробега электронов в металле. Этот результат Френкель смог получить, представив движение электронов в металле как волновой процесс.

С помощью теории Френкеля можно было дать объяснение дополнительного сопротивления при введении примесей в металлы. Из-за примесей кристалл становится еще более мутным для электронных волн, подобно тому, как атмосферный воздух мутнеет от пыли. На международном конгрессе в Комо в сентябре 1927 г., накануне Пятого Сольвеевского конгресса, Френкель сделал доклад о «теории блуждающих электронов» и получил, по его словам, «благоприятный резонанс» [181, с. 201]. В книге, посвященной памяти Френкеля, можно увидеть любопытную деталь, характеризующую отношение к новой волновой механике и настроение ведущих физиков в 1927 г. По поводу вышедшей на немецком языке «Электродинамики» Френкеля «скептический Паули заметил, что книга появилась несвоевременно - умы физиков сейчас заняты волновой механикой. «Хорошо, Паули, - отшутился Яков Ильич, - я не подарю вам второй ее том, а засяду за «Волновую механику» [181, с. 202]. В 1933 г. появились два тома «Волновой механики» Я.И. Френкеля. В первом томе, который назывался «Элементарная теория», рассматривалась теория Шредингера, основанная на разработанных де Бройлем представлениях о фазовой волне, групповой и фазовой скорости, а также квантовая статистика и электронная квантовая теория металлов.

Лишь в короткий начальный период утверждения корпускулярно-волнового дуализма материи и становления волновой механики

(1926-1929) имена авторов Л. де Бройля и Э. Шредингера писались вместе, и волновая механика называлась механикой Шредингера-де Бройля. К. Дарроу в своем докладе, опубликованном, в том числе и в «Успехах физических наук», пользуется термином «волновая механика де Бройля – Шредингера» и называет основное уравнение волновой механики волновым уравнением де Бройля и Шредингера [54]. Дарроу пишет, что «волновая механика де Бройля-Шредингера является новым способом объяснения широкой области известных уже явлений» [Там же, с. 438]. Впоследствии в литературе закрепился термин волновая механика Шредингера. Роль де Бройля в создании волновой механики оказалась, таким образом, сведена до незначительного упоминания в виде волны де Бройля, для которой Шредингер разработал математический аппарат и дал физическое объяснение.

Несмотря на то, что статьи Шредингера по волновой механике появились спустя полгода после первого, матричного варианта квантовой механики Гейзенberга, именно волновая механика ускорила всеобщее признание новой теории - квантовой механики, описывающей поведение микрообъектов. Джеммер отмечал некоторую «пассивность, с которой была встречена матричная механика Гейзенберга». Эта пассивность исходила, прежде всего, как из-за новизны «математического формализма, и, по крайней мере, частично, непривычности ее концептуальных предпосылок» [53, с. 206]. После появления волновой механики стало очевидно ее преимущество перед матричной механикой. Ее применение было в математическом и в физическом отношении проще, привычнее, и она позволяла решать более широкий класс задач атомной физики. Число сторонников волновой механики было значительно больше. Шредингер вслед за основополагающими статьями по волновой механике показал эквивалентность матричной и волновой механики, и это открыло путь к вероятностной трактовке М.Борном волновой функции.

Восприятию волновой механики Шредингера в СССР посвящена работа Вл.П. Визгина [40]. В ней автор рассматривает деятельность в области новой нарождающейся физики, какой была квантовой механика в 20-е годы прошлого века, в научных центрах, сконцентрированных в Ленинграде и Москве. В Ленинграде под руководством А.Ф. Иоффе формировалась научная школа, в которой ведущими теоретиками были Я.И. Френкель, В.Р. Бурсиан, Ю.А. Крутков, В.К. Фредерикс. Московская школа формировалась вокруг Л.И. Мандельштама, возглавившего в 1925г. кафедру теоретической физики в МГУ. Становление советской физики во многом было связано с созданием научных школ [84].

В 1927 г. в СССР, так же как и в других странах, большое значение придавалось развитию новой физики, ее нового понятийного ап-

парата. Визгин называет «событием» выход в свет сборника «Основания новой квантовой механики» под редакцией А.Ф. Иоффе. Иоффе в предисловии к сборнику, который содержал статьи ленинградских физиков - П.С. Тартаковского [162], В.Р. Бурсиана [33], Н.Н. Андреева, В.А. Фока и др., ставил задачу сделать квантовую механику достоянием «возможно широких кругов физиков» [116]. Он указывал на решающий вклад в понимание волновой и атомной структуры света идей де Бройля и Эйнштейна, которые были приведены в систему в «новой механике» Шредингера. «Синтез движения точки и волны - это большое завоевание физической мысли, которое, несомненно, определит ее судьбы и на будущее время. Теория Шредингера подвергнется еще, вероятно, значительным изменениям, и надо думать, что для нее найдется и более ясное конкретное физическое толкование. Но она будет исходной точкой того, что придет дальше» - писал Иоффе в 1927 г. [116, с. 2].

В статье Н.Н. Андреева, вышедшей в этом же году и в УФН [2], была подробно рассмотрена оптико-механическая аналогия, которой воспользовался Л. де Бройль, а позже Шредингер для построения волновой механики. В.Р. Бурсиан в статье «Волновая механика Шредингера» [33] подчеркивает важность идей де Бройля, «которые послужили отправной точкой Шредингеру при создании его теории», и он повторяет в статье его вывод фазовой скорости. Математический аппарат волновой механики изложили В.А. Фок и В.К. Фредерикс.

В 1927 г. в Журнале Русского физико-химического общества появилась статья профессора Иваново-Вознесенского политехнического института К.Н. Шапошникова, которая по своему названию перекликается с «Попыткой построения теории световых квантов» Л. де Бройля, но автор явно с ней не знаком, - «Новый принцип динамики световых квантов» [186]. В ней ведется примитивное рассмотрение уравнения движения материальной точки и на его основе, без всякого учета теории относительности, предлагается построить механику световых квантов. Автор пишет: «движение кванта света со скоростью меньшей, чем предельная, должно быть подчинено законам классической динамики» [186, с. 109]. Любопытно, что отрицательная рецензия на эту статью была написана Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау, которые заключают, что «загадочное» в теории световых квантов свелось у автора к ряду произвольных, ничем не оправдываемых, не менее загадочных гипотез. В этом же журнале, в следующем выпуске, Иваненко и Ландау опубликовали статью «Связь волновой механики с классической» [65, 66], в которой они показывают, следуя Шредингеру, как установить соответствие между волновой и классической механикой. Исходным пунктом для получения уравнения Шредингера они берут связь действия  $W$  и фазы  $\phi$ , впервые рассмотренную де Бройлем.

Орест Данилович Хвольсон (1859-1934), российский и советский физик и педагог, написавший один из лучших университетских курсов физики («в 1902 г. вышел превосходный учебник физики Хвольсона»- писал Эйнштейн [203, с. 181]), уделял много внимания работам Л.де Бройля, высоко ценил его достижения, и способствовал распространению его идей среди советских физиков. В сборнике статей «Физика наших дней», вышедшем в 1928 г., есть его статья «Новая волновая механика», где Хвольсон излагает основные идеи Л.де Бройля. Он пишет: «Л. де Бройль первый пошел по совершенно новому пути, пытаясь согласовать волновую и квантовую теории лучистой энергии. Однако он не ограничился тем, что объединил эти две теории в одну, он значительно расширил область применения своих основных мыслей, приложив их не только к световым квантам, но, и ко всякого рода «частицам», к которым принадлежит атом, электрон, протон, а также и световой квант. Последнему он приписывает такие же свойства, как и, привычным нам, материальным частицам. Благодаря такому расширению области применения своих идей, де Бройль сделался основателем волновой механики» [184, с. 327]. Хвольсон особенно подчеркивал значение экспериментов конца 1927 и начала 1928 г., которые подтверждали гипотезу фазовых волн де Бройля. При этом он отмечал, что «при изучении нового учения мы с первого же шага наталкиваемся на что-то весьма неясное, мало вразумительное, туманное» [Там же, с. 328]. Хвольсон хорошо знал диссертацию де Бройля, его последующие статьи, эти результаты обсуждаются им в статье: «групповая скорость фазовой волны равна скорости самой частицы. Мы видим, что групповая скорость есть скорость перемещения энергии. Все это приводит к разным мыслям, вроде: фазовая волна «несет частицу на своем гребне» или она «ведет частицу» [Там же, с. 330].

В первом издании Большой Советской Энциклопедии (БСЭ) в 1928 г. в статье «Волны» содержался параграф «Материя как волновое движение (волны де Бройля)», написанный Ф. Франком. Можно только удивляться, как быстро менялись в первые десятилетия XX века представления о физическом мире, и новые знания становились достоянием энциклопедий. От момента защиты диссертации де Бройлем в конце 1924 г., когда им была представлена синтетическая теория, объединяющая корпускулярные и волновые свойства материи, создания Шредингером формализма волновой механики в 1926 г. и экспериментального подтверждения волновой природы электрона в 1927 г., до статьи в БСЭ прошло всего три года. Автор статьи выделил достижение де Бройля, рассмотрел теорию волн материи, и ее значение для последующего развития физики, описывающей микрообъекты. Он писал: «В последнее время Луи де Бройль предложил следующее толкование затруднений, связанных с квантовыми явлениями-

ми. Подобно тому, как законы геометрической оптики теряют силу, когда размеры препятствия такого же порядка как и длина волны, так и законы механики теряют силу в применении к столь малым объектам, каковы электроны и их орбиты в атоме. По аналогии с волновой оптикой, дополняющей геометрическую, учение о движении в малых размерах должно быть заменено «волновой механикой» [172, с. 753]. «Гипотеза де Брайля была развита Шредингером в математически последовательную теорию. Основная тенденция этой теории – не слияние материи и света в понятии движущейся частицы, но наоборот, сведение движения самой материи к понятию волны» [172, с. 754]. Первые эксперименты по дифракции электронов были осуществлены в 1927 г., а уже в 1928 г. в БСЭ этот факт нашел свое отражение: «Дифракция электронов на кристаллах действительно обнаружена».

На съездах русских физиков, организатором которых выступил А.Ф. Иоффе, в период с 1924 по 1928 гг. достижениям Л. де Брайля и в целом волновой механики, уделялось много внимания. Визгин пишет, что определенное представление о «квантовом заделе» дает IV съезд русских физиков [40, с. 452] На IV съезде русских физиков в сентябре 1924 г. с докладом о корпускулярно-волновом дуализме света, о синтетической теории Л. де Брайля выступил О.Д. Хвольсон. В докладе обсуждались проблемы старой квантовой теории Бора, новые теории Бора-Крамерса-Слэтера, а также синтетическая теория Л.д.Брайля. В дискуссии принимали участие П. Эренфест, А.Ф. Иоффе.

На V съезде русских физиков в декабре 1926 г. центральной темой была «новая квантовая механика» и один из общих докладов был сделан В.Р. Бурсианом о волновой механике [33]. Он особенно подчеркнул такое достоинство волновой механики, как ее эвристичность, то, что квантовая механика в форме Шредингера и де Брайля дала повод к постановке очень глубоких новых проблем [33, с. 82]. В.А. Фок в своем выступлении говорил о синтезе классических концепций дискретного и непрерывного, который был осуществлен Л. де Брайлем.

В августе 1928 г. проходил VI Всесоюзный съезд физиков, собравший большое число как советских, так и иностранных физиков, председателем был А.Ф. Иоффе. Съезд начался в Москве, а затем продолжился на теплоходе по Волге, было прочитано более 150 докладов, это было значительное событие для дальнейшего развития физики в СССР. В отчете ученого секретаря съезда Т.П. Кравца написано, что «наиболее широкой темой для обсуждения послужили вопросы, связанные с так называемой волновой механикой. Еще так мало времени прошло с тех пор, как де Брайль провозгласил свой принцип, что за каждым материальным явлением, наблюдаемом нами, скрывается лежащая в его основе волновая картина, и дал соотношение между наблюдаемым материальным движением и колебатель-

ными параметрами эквивалентного ему распространения волн» [79, с. 915]. Несмотря на то, что уравнение Шредингера появилось всего около двух лет назад, на этом съезде отмечался всплеск работ, которых уже больше сотни, в них авторы стремятся выяснить разнообразные следствия теории де Брайля–Шредингера, «ряд ученых выясняет основное значение уравнений Шредингера, то доказывая их статистический характер, то сомневаясь в этом положении» [Там же]. На этом съезде теории де Брайля–Шредингера были посвящены доклады Я.И. Френкеля, Д.Д. Иваненко и Л.Д. Ландау. По-поводу доклада Френкеля в отчете о съезде было написано: «Я.И. Френкелем на пароходе было прочитано два сообщения по волновой механике в более популярной форме для лиц, стоящих несколько дальше от теории» [Там же, с. 918].

Дальнейший процесс восприятия волновой механики протекал в направлении развития преподавания ее и в создании учебной литературы. Особое место занимают публикации монографий по волновой механике, написанные ведущими советскими физиками, где дано ее систематическое и полное изложение. Курс лекций, прочитанный, Ю.Б. Румером в МГУ, назывался «Введение в волновую механику» и был издан в 1935 г. [136]. В 1932 г. вышла монография П.С. Тартаковского «Экспериментальные основания волновой теории материи», в которой рассматривались эксперименты, подтверждающие существование волн де Брайля, а также рассматривалась теория де Брайля и Шредингера [164]. В этом ряду находится и фундаментальная книга «Начала квантовой механики» В.А. Фока, вышедшая в 1932 г. [169].

## **7.2. Публикации Л. де Брайля и о нем в УФН 1924 - 1988 гг.**

О широкой известности работ де Брайля в СССР в период становления волновой механики говорят многочисленные публикации его работ, а также статей о нем в ведущем физическом журнале «Успехи физических наук» (УФН).

Первая публикация на русском языке, посвященная изложению основных идей де Брайля, вышла в журнале «Успехи физических наук» в конце 1924 г. Это была статья Я.И. Френкеля [176] в рубрике журнала «Из текущей литературы», и она представляла собой реферат работы де Брайля, опубликованной в этом же году на английском языке в журнале «Philosophical Magazine». Таким образом, практически одновременно в конце 1924 г. состоялась защита диссертации де Брайля в Париже и выход в свет основных идей его диссертации на английском и русском языках. Значение публикации в УФН в 1924 г. для отечественной науки трудно переоценить, благодаря таким работам, как статья Френкеля, советские физики получали возможность одновременно со всем мировым сообществом участвовать в развитии современной физики.

Френкель выражал собственную высокую оценку работы де Брайля: «Реферируемая работа представляет собой весьма остроумную и интересную попытку связать воедино волновую и корпускулярную теорию света, крайними представителями которых являются в настоящее время Эйнштейн – с одной стороны и Бор – с другой» [176, с. 22]. Он называет теорию де Брайля синтетической и пишет, что «противопоставление частиц волнам неправильно; каждая частица связана с «фазовой» или «ведущей» волной и, наоборот, всякая электромагнитная волна – с какой-либо частицей, несущейся в направлении одного из ее «лучей» [Там же]. Синтетическая теория де Брайля, по словам Френкеля, объединяет в себе свойства фазовых волн, которые «сами по себе никакой энергии не имеют: действие их сводится к тому, чтобы вызывать в предварительно возбужденных атомах тормозные переходы, связанные с уменьшением механической энергии, и излучением, которые в теории Бора трактуются как спонтанные», и энергию материальных частиц, которая связана с частотой колебательного процесса. Френкель характеризует новую теорию де Брайля как «новую корпускулярно-волновую динамику материи», и подчеркивает, что Эйнштейн рассматривает кванты света не связанные с каким-либо материальным носителем, а де Брайль «трактует их как обыкновенные материальные частицы, ...обладающие ...вполне определенной «покоящейся массой» [Там же]. В статье Френкель указывает на тот факт, что включение де Брайлем световых квантов в теорию Бора вместо «лучистой энергии» позволяет не отказываться от закона сохранения энергии. Френкель упоминает работу Бора, Крамерса, Слетера [218], опубликованную в том же 1924 г., в которой предлагался отказ от выполнения закона сохранения энергии. Теория де Брайля представляется попыткой «связать воедино две стороны световых явлений - интерференционную и фотоэлектрическую... органически, а не формально, как в теории Бора, слить оптику с динамикой в одно неразрывное целое», заключает Френкель. Важно отметить, что в статье Френкеля отсутствуют идеи де Брайля о возможности экспериментального наблюдения волновых свойств материальных частиц, он отмечает лишь корпускулярно-волновой дуализм света, который получил свое объяснение при соединении световых квантов и их фазовых волн. Таким образом, явление интерференции, которое «в концепции Эйнштейна оставалось совершенно непонятным» [176, с. 332], в теории де Брайля становится очевидным.

Кроме Френкеля высокую оценку волновых идей де Брайля дал И.Е. Тамм в своей статье «Новые принципы статистической механики Бозе-Эйнштейна в связи с вопросом о физической природе материи», напечатанной в начале 1926 г. в УФН, которая была посвящена квантовой статистике Бозе-Эйнштейна. Тамм пишет, что в новой статисти-

ке «выяснена глубокая связь между новыми принципами исчисления вероятностей и одной из интереснейших новых квантовых теорий – теорией де Бройля, обещающей пролить неожиданный свет на физическую природу материи» [160, с. 112]. Тамм рассматривает вопросы, которые возникают из следствия о взаимодействии между молекулами идеального газа. Это взаимодействие можно рассматривать как интерференцию особого рода волн, неразрывно связанных с молекулами идеального газа. Отдельный параграф статьи называется «Интерференция молекул и теория де Бройля». Перед ним Тамм ставит фундаментальные вопросы: «Какова же природа этих таинственных волн? Да и вообще, можно ли и нужно ли вводить в физику совершенно новое представление об особого рода волнах, неразрывно связанных с каждой материальной частицей? Самое сопоставление взаимодействия молекул с интерференцией волн, не носит ли характера чисто формальной аналогии?» [160, с. 134]. Это были вопросы, которые возникали у всех, знакомящихся с работами де Бройля, а также работами Эйнштейна 1924 и 1925 гг. по квантовой статистике. Чуть позже, в этом же 1926 г. Шредингер даст ответ в виде волнового уравнения, описывающего квантование фазовых волн... В своей статье Тамм повторяет ход рассуждений, которые привели де Бройля к фазовой волне и называет «крупнейшей заслугой де Бройля», что ему удалось впервые дать «чрезвычайно остроумную попытку рационального истолкования основного постулата квантовой теории периодических систем (постулат стационарных состояний)» [Там же, с. 136]. Вывод, к которому в конце статьи приходит Тамм, позволяет говорить о глубоком понимании основного результата, который достигнут в работе де Бройля. Тамм пишет: «Итак, с движением материальных частиц неразрывно связаны особого рода волны, подобно тому как с движением светового кванта связаны световые волны: между материей и светом существует гораздо более глубокое сходство, чем это можно было предполагать до последнего времени» [Там же, с. 139].

Эти две публикации Френкеля и Тамма в УФН, считает Вл.П. Визгин, «во многом предопределило быстрое и активное восприятие волновой механики Шредингера ими и кругом физиков, к ним примыкающих» [40, с. 453].

В 1929 г. в УФН была напечатана небольшая рецензия С.И. Вавилова [36] на книгу Л. де Бройля «Введение в волновую механику», вышедшую в этом же году на немецком языке в Лейпциге. Вавилов пишет, что книга написана «творцом основной идеи волновой механики – идеи о материальных волнах и неразрывной связи понятия корпускулы с понятием волны». Вавилов особо отмечает стиль изложения де Бройля: «Изложение очень ясное, выкладки не требуют от читателя сугубо напряженного внимания; применяемый математический

аппарат будет вполне понятен студенту физику и математику старших курсов». Эта книга де Бройля была впоследствии, в 1933 г., переведена на русский язык Д.Д. Иваненко и широко использовалась в качестве учебника по волновой механике [22]. Также в 1929 г. на немецком языке вышла книга А. Зоммерфельда «Строение атома и спектры», рецензию на которую написал в УФН Э.В. Шпольский (он был редактором журнала, и свою рецензию подписал как Э.Ш.) [194]. В рецензии основное внимание обращалось на изложение основ волновой механики, и подчеркивалось преимущество методов Шредингера по сравнению с матричным рассмотрением Гейзенберга.

К 75-летию Л. де Бройля в УФН была подготовлена публикация переводов его статей: «Волны и кванты», «Кванты света, дифракция и интерференция», «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма» [27], которые были написаны в 1923 г. и легли в основу диссертации. Эту публикацию открывала небольшая заметка С.Г. Суворова с кратким указанием вклада де Бройля в развитие физики. Последней публикацией в УФН, посвященной научному творчеству де Бройля, была статья Я.А. Смородинского и Т.Б. Романовской в 1988 г. в связи со смертью Л. де Бройля [144].

### **7.3. Переводы и публикации работ Л. де Бройля в СССР**

За свою долгую жизнь Л. де Бройль написал огромное количество научных работ, вся жизнь его была посвящена физике. Семейный девиз основателей рода де Бройлей «Ради будущего» был девизом, которому следовал в своей жизни Л. де Бройль. Он сознательно выбрал служение науке, педагогическую деятельность, широкий круг обязанностей непременного секретаря Французской академии, эта деятельность составляла смысл его жизни. Его первая научная статья датирована 1920-ым, последняя - 1979 г., кроме этого были опубликованы более 30 монографий, 10 книг по философии естествознания. Библиографический список работ Л. де Бройля приводится в прил. 3.

Первый курс лекций, опубликованный де Бройлем в 1930 г., под названием «Введение в волновую механику» был посвящен изложению вероятностной интерпретации квантовой механики, и демонстрирует присущий всем книгам де Бройля ясный и наглядный стиль изложения. Далее последовали монографии, посвященные различным вопросам квантовой механики, теории электромагнитных волн, волновой механики фотона. «Энциклопедическую многоплановость» творчества де Бройля подчеркивал И.В. Кузнецов в своем послесловии к русскому переводу докладов, выступлений и статей де Бройля в книге «По тропам науки». Он писал: «В каждой из областей физической науки, привлекших внимание де Бройля, он сказал свое слово. Здесь и данные им формулы, выражющие закономерности поглощения рент-

геновских лучей; и исследования, связанные с классификацией рентгеновских спектральных линий; и применение принципа Гюйгенса к радиоволнам, и анализ возможностей так называемых «корпускулярных микроскопов» для отображения внутренней структуры атомов; и изучение новым, разработанным им методом распространения световой энергии в анизотропных оптических средах; и решение тонких вопросов релятивистской термодинамики» [14, с. 384.].



*Л. де Б्रойль после доклада с одним из организаторов его выступления.  
Снимок сделан в 1957 г. Я.П. Терлецким*

Ж. Лошак отмечал, что де Б्रойль умел говорить о науке строго и просто, емким литературным языком. «Он увлекал целые поколения читателей и его книги стали библиографической редкостью» [104, с. 104]. О работах де Бройля после 1932 г., посвященных теории света, в которых фотон рассматривается не как элементарная частица, а как результат слияния двух частиц Дирака, известно не столь широко. Гейзенберг писал по поводу новой теории света де Бройля, что «мысль высказанная де Бройлем в 1936 г., что кванты света должны также рассматриваться как составные образования, приводит к проблемам в принципе того же значения, что и те, которые вызвало знаменитое открытие волн материи» [104, с. 112]. Де Бройль в письме Ф. Кубли от 17 февраля 1969 г. высказывал сожаление, что его статьи и книги, которые он опубликовал по вопросам углубления и развития волновой механики, остались неизвестны физикам – теоретикам. Он писал: «Эти публикации остались почти незамеченными, и большинство физиков-теоретиков о них не знала... Я убежден, что если бы лучше знали те идеи, которые владели мной в момент открытия волновой механики, и которые определили все последующее развитие

квантовой физики, то придали бы намного большее значение моим настоящим работам» [217, 42J-12].

В прил. 2 приведен список книг Л. де Бройля, переведенных на русский язык, к 1986 г. он состоял всего из 7 книг, эти книги пользовались огромной популярностью и стали библиографической редкостью. Л. де Бройль писал исключительно на французском языке, и те немногие его труды, которые появились в русском переводе, были изданы более 30 лет назад. В России в 2009 г. редакционная коллегия, состоящая из А.А. Рухадзе, Ю.П. Рыбакова, Н.В. Самсоненко, А.Ф. Смык, Л.И. Уруцкоева и А.М. Цыганенко, главным редактором выступил Ж. Лошак, приступила к первому изданию собрания избранных научных трудов Луи де Бройля в пяти томах [145]. Тем самым хотя бы в некоторой степени восполнить пробел в нашей научной литературе и способствовать доступности трудов де Бройля, прежде всего для молодого поколения, которому он завещал свои незавершенные труды. Л. де Бройль является одним из первооткрывателей квантовой механики, его работы отражают поиски и открытия на пути переплетения экспериментальных фактов и теоретических попыток их объяснения. Для молодых людей, приступающих к своим оригинальным исследованиям, важно знать исторические корни квантовой механики, а не руководствоваться только ее строго аксиоматической формой, в которой подчас упрощаются или вообще отбрасываются идеи, которыми руководствовались ее основатели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перед автором данной книги стояла задача - дать историко-научный анализ вклада Луи де Бройля в создание квантовой механики. Если посмотреть на хронологию истории создания квантовой механики (прил. 4), то открытие корпускулярно-волнового дуализма материи Л. де Бройля занимает в ней центральное место. Оно способствовало созданию математического аппарата волновой механики Э. Шредингером, а также развитию вероятностной интерпретации волновой функции М. Борном, и формированию принципа дополнительности Н. Бором. Открытие де Бройля оказало влияние на А. Эйнштейна при создании им квантовой статистики идеальных одноатомных газов. Теоретическое открытие волн де Бройля стимулировало поиск экспериментальных доказательств дифракции этих волн. Автор настоящего исследования стремился показать, что вклад Л. де Бройля в создание квантовой механики является фундаментальным и выходящим за рамки просто формулы длины волны де Бройля, вошедшей во все учебники физики. Наши аргументы приводились с учетом делением научной деятельности Л. де Бройля на следующие этапы.

I. Этап становления и выбора жизненного пути. Этот период можно считать завершенным в 1913 г. вместе с получением степени

лиценциата по естественным наукам в Парижском университете. Ключевым событием для де Бройля стал Первый Сольвеевский конгресс по физике с темой «Теория излучения и кванты», который проходил в 1911 г. Именно в это время произошло формирование научных приоритетов, связанных с «проблемой квантов». В будущем открытии де Бройля можно отметить особую роль, которую сыграли его стиль мышления и мировоззрение, во многом сформировавшиеся под влиянием французских научно-философских традиций.

II. Этап определения цели будущих исследований, который начался в 1913 г., и завершился в 1921 г. Служба в инженерных войсках во время Первой мировой войны (1913–1919) прервала научную работу де Бройля, повлияла на формирование будущего одиночества в его исследованиях. Происхождение столь оригинальной идеи Л. де Бройля о существовании колебательного процесса, связанного с движением материальной частицы, во многом объясняется его изоляцией от ведущихся в то время поисков квантовой теории. Работа в лаборатории брата, М. де Бройля, дала Л. де Бройлю ключ к пониманию природы не только рентгеновского излучения, но и видимого света. В нашем исследовании показана выдающаяся роль А. Эйнштейна как предтечи идей Л. де Бройля о корпускулярно-волновом дуализме материи. Изучение проблемы корпускулярно-волнового дуализма света позволяет сделать вывод о том, что ее решение неявно содержалось в работах Эйнштейна 1905–1909 гг. Но именно де Бройлю принадлежит идея создания синтетической теории, описывающей на одном онтологическом уровне движение микрочастиц и распространение волн, ассоциированных с этим движением. Концепция дуализма света была им сформулирована вместе с концепцией дуализма всей материи. Луи де Бройль включил и фотоны в число частиц, рассматриваемых в его теории, придав им бесконечно малую массу и назвав их атомами света.

III. Этап формирования идеи корпускулярно-волнового дуализма материи, который продлился с 1922 г. по 1924 г. В этот период Л. де Бройль совершил теоретическое открытие волновой природы электрона. В генезисе его открытия имелось множество связанных между собой факторов, начиная с французских научных и научно-философских традиций и заканчивая оптико-механической аналогией. В настоящем исследовании показаны роль и прямое влияние диссертации Л. де Бройля, которая явилась обобщением его более ранних статей, на работы А. Эйнштейна, Э. Шредингера, В. Эльзассера, а также К. Дэвиссона, Дж.П. Томсона и ряда других экспериментаторов, исследовавших дифракцию волн де Бройля.

Термин волновая механика впервые появился в работах де Бройля 1923 г., как обозначение новой динамики, описывающей дви-

жение микрочастиц, отличающейся от прежних динамик - Ньютона для макротел с относительно малыми скоростями движения и Эйнштейна в рамках теории относительности. Де Бройль первым показал, рассматривая оптико-механическую аналогию, что новая динамика соотносится с прежними также, как волновая оптика с геометрической. Истоком этой теории послужила фундаментальная аналогия между светом и веществом. Так же как и свет, электрон должен обладать двойственными свойствами – корпускулярными и волновыми. Де Бройль считал, что частицы света и частицы материи не являются противоположными сущностями, они едины по сути, и должны рассматриваться единым образом, т.е. должно существовать единое для всех частиц динамическое описание. В своей диссертации, защищенной в 1924 г., де Бройль развил идею фазовой волны, которая появилась как результат релятивистской инвариантности уравнения, записанного впервые де Бройлем

$$\hbar v_0 = m_0 c^2.$$

Идея фазовой волны де Бройля стала революционной. Де Бройль показал, что групповая скорость волнового пакета, образованного из этих волн, равна скорости движения частицы. Таким образом, фазовые волны управляют переносом энергии, что позволило де Бройлю объяснить волновые явления интерференции и дифракции. Очень скоро, в 1927 г., было получено и экспериментальное подтверждение существования волновой природы электрона, а позже и других частиц вещества.

Диссертация де Бройля имеет большое историческое значение. Отзыв членов комиссии по защите диссертации, подписанный П. Ланжевеном и Ж. Перреном, публикуется впервые на русском языке, и говорит о высокой оценке, которую получил де Бройль на защите. После этого появилось одобрение идей де Бройля, высказанное Эйнштейном в письмах к П. Ланжевену и Х. Лоренцу, написанными в один день - 16 декабря 1924 г. Работы Э. Шредингера 1926 г. по волновой механике явились развитием идеи фазовой волны де Бройля, в них неоднократно давалась ссылка на диссертацию де Бройля. Для фазовой волны де Бройля Шредингер записал нерелятивистское волновое уравнение, в котором частица была исключена из рассмотрения. Интерпретация квантовой механики, основанная на соотношении неопределенностей Гейзенberга и принципе дополнительности Бора, была создана после формирования законченного математического аппарата волновой механики Э. Шредингером.

IV. Этап поиска физического смысла корпускулярно-волнового дуализма с 1924 по 1927 г. Де Бройль разработал теорию двойного решения, которую он изложил в статье «Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения». Важной вехой на этом

этапе явился Пятый Сольвеевский конгресс по физике в 1927 г. Де Бройль выступил с докладом, в котором изложил упрощенную форму своей теории. Теория двойного решения привлекла внимание ведущих физиков, в том числе и В. Паули, вызвала широкое обсуждение на конгрессе. Осознавая затруднения теории двойного решения, де Бройль оставил работу по ее дальнейшему развитию и присоединился к вероятностной интерпретации квантовой механики.

V. Этап, связанный с преподавательской деятельностью и созданием научного семинара, начался в 1928 г., когда Л. де Бройль был избран профессором в Институте Анри Пуанкаре. Наравне с вкладом де Бройля в создание квантовой механики следует рассматривать и его вклад в преподавание квантовой механики. На протяжении нескольких десятилетий де Бройль читал лекции по различным вопросам квантовой механики, руководил кафедрой теоретической физики в Институте Анри Пуанкаре, воспитал огромное число учеников. Курсы лекций, опубликованные де Бройлем, считаются во всем мире лучшими учебниками по квантовой механике.

В СССР идеи де Бройля в годы создания квантовой механики вызвали положительное восприятие, способствовали развитию школ советской теоретической физики. Осознание важности вклада Л. де Бройля в создание и развитие квантовой механики привело коллектив российских физиков к изданию собрания избранных научных трудов Луи де Бройля.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

MINISTÈRE de l'EDUCATION NATIONALE

Physiques

FACULTÉ des SCIENCES de l'UNIVERSITÉ de PARIS

25 Novembre 24

Mr de Broglie

R A P P O R T

Perrin

sur la THESE de M<sup>r</sup> Louis de BROGLIE

Cartan

Victor, Pierre, Raymond.

Mauguin

Langevin

" Recherches sur la théorie des quanta "

Le travail de M. Louis de Broglie représente un effort important vers la solution du problème fondamental de la Physique actuelle, celui de la synthèse des deux théories optiques des ondulations et des quanta, contradictoires jusqu'ici, au moins en apparence, et dont chacune s'appuie sur tout un ensemble de faits et de confirmations expérimentales remarquables. Leur opposition vient renouveler de manière imprévue l'ancien conflit de l'émission et des ondulations.

Les énoncés d'aspect paradoxal qu'a dû introduire la théorie des quanta sont eux-mêmes de deux ordres. Du côté dynamique, il a fallu pour rendre compte de la composition du rayonnement noir ainsi que de la structure des spectres d'émission et d'absorption, admettre avec Planck, Bohr, Sommerfeld, que, parmi tous les mouvements des centres électrisés compatibles avec les lois de la dynamique classique, seuls sont possibles ou stables ceux dont

les trajectoires satisfont à certaines relations numériques simples. D'autre part J.J. Thomson et Einstein ont montré que pour rendre compte des effets photoélectriques ainsi que des fluctuations du rayonnement noir il semble nécessaire d'admettre une structure discontinue du rayonnement qui serait formé par exemple, de grains d'énergie de grandeur proportionnelle à la fréquence, les "quanta de lumière".

L'idée fondamentale de M. de Broglie consiste à unifier ces deux formes d'énoncés en associant à chaque particule électrisée considérée comme un grain indépendant d'énergie, un phénomène périodique de fréquence proportionnelle à l'énergie du grain, exactement comme l'hypothèse des quanta de lumière associe aux ondes électromagnétiques périodiques des grains non électrisés où l'énergie du rayonnement se trouve concentrée.

La liaison ainsi établie entre le mouvement d'une particule électrisée ou non (électron ou proton au quantum de lumière) de vitesse  $B c$  et un phénomène périodique se propageant avec la vitesse  $\frac{c}{B}$  est rattachée de manière très profonde aux principes généraux, par une série de remarques telles qu'une hypothèse paradoxale au premier abord apparaît de plus en plus conforme à la nature des choses et capable de grouper de manière impressionnantes des conceptions et des résultats qui semblaient contradictoires.

L'auteur montre, en particulier, que les relations introduites par lui entre le mouvement d'un grain d'énergie et la propagation du phénomène périodique associé sont exactement de même nature que celles introduites par Lord Rayleigh et Gouy entre le mouvement d'un groupe d'ondes et la propagation de la phase d'une onde exactement périodique.

D'autre part, et ceci est peut-être l'aspect le plus intéressant, cette liaison semble correspondre à une analogie profonde entre les énoncés d'intégrales stationnaires qui sont à la base de la dynamique, d'une part, avec les principes d'Hamilton et de Maupertuis et de la théorie des ondulations, d'autre part, avec le principe de Fermat tel que l'introduisent et le justifient les conceptions d'Huyghens et de Fresnel.

De même que les principes de la dynamique du point matériel prennent leur expression la plus simple grâce à l'introduction

tion d'un Vecteur d'Univers dont les composantes d'espace représentent la quantité de mouvement et la composante de temps l'énergie, l'auteur montre que le principe de Fermat et toute la cinématique des ondes conduisent à introduire un "vecteur d'onde" d'Univers dont les composantes d'espace déterminent la normale à l'onde et dont la composante de temps est la fréquence.

L'introduction de ces deux vecteurs conduit tout d'abord à généraliser la relation du quantum sous une forme adéquate au principe de relativité et à préciser la relation entre le mouvement d'une particule et le phénomène périodique associé, en affirmant l'identité des deux vecteurs impulsion d'univers et vecteur d'onde, ou plutôt, en raison du choix des unités, la constance de leur rapport, égal à la constance  $\hbar$  de Planck. On étend ainsi la relation du quantum, envisagée jusqu'ici pour les seules composantes de temps, énergie et fréquence.

Dans ces conditions les principes d'Hamilton et de Fermat se confondent et représentent deux aspects d'un même principe. Peut-être y a-t-il là la possibilité d'une interprétation conduisant des principes de la dynamique. En tout cas une conséquence immédiate de l'unification des deux vecteurs est que les trajectoires dynamiquement possibles de la particule dans un champ de force se confondent avec les rayons du phénomène périodique associé.

De là se déduisent immédiatement les conditions dynamiques de quanta sous la forme de Bohr et de Sommerfeld, si l'on admet qu'une trajectoire fermée ne peut être stable que si l'onde associée au mobile et qui se propage le long de cette même trajectoire avec une vitesse supérieure à celle du mobile doit, en rejoignant celui-ci, se retrouver en concordance de phase avec elle-même. Cette condition de résonance des trajectoires stables pour l'onde associée fournit les conditions de quanta sous leur forme la plus générale et en donne une représentation singulièrement suggestive malgré l'obscurité qui subsiste encore quant à la nature physique du phénomène périodique associé au grain d'électricité.

En appliquant les mêmes conceptions au cas du gaz contenu dans un récipient à parois supposées réfléchissantes pour les ondes associées, l'auteur retrouve sans hypothèse nouvelle

l'expression donnée par Planck pour la constante de l'entropie ou constante chimique du gaz.

La notion des quanta de lumière se présente ici sous une forme assez différente de celle qui leur attribue la vitesse de la lumière. Pour M. de Broglie ces quanta sont des grains d'énergie non électrisés se mouvant moins vite, tandis que l'onde associée se propage plus vite, que la lumière, avec les mêmes relations que dans le cas dynamique. Malgré les difficultés que soulève cette conception, il est remarquable qu'elle s'accorde avec tous les faits cinématiques et dynamiques concernant la propagation des ondes, effet Doppler, pression et fluctuations de radiation etc, ainsi que la loi du rayonnement noir sous la forme de Planck.

M. de Broglie a poursuivi ici, avec une cohérence et une maîtrise remarquables, un effort qui devait être tenté pour vaincre les difficultés au milieu desquelles nous sommes. L'originalité et la profondeur des idées, la coordination remarquable qu'elles permettent, justifient largement l'acceptation de son travail comme thèse de Doctorat ès Sciences.

signé: P. Langevin.

La thèse a été brillamment soutenue. Mention TRES HONORABLE.

signé: Jean PERRIN.

Министерство образования  
Факультет науки Парижского университета  
Отзыв<sup>1</sup>

**Диссертация господина Луи Виктора Пьера Раймона де Бройля  
«Исследования по теории квантов»**

25 ноября 1924 г.

Работа господина Луи де Бройля является существенным достижением в решении проблем современной физики, она представляет собой синтез двух оптических теорий волн и квантов, до настоящего времени противоречивых, по крайней мере, по внешнему виду, каждая из которых опирается на совокупность фактов и замечательных экспериментальных подтверждений. Их противоположности снова воскрешают, неожиданным образом, старый конфликт между излучением и волнами. Изложение парадоксального аспекта, который должен быть введён в квантовую теорию, имеет две стороны. С динамической точки зрения, надо принять во внимание изучение состава излучения абсолютно черного тела, а так же структуры и спектра излучения и поглощения, осуществленное Планком, Бором и Зоммерфельдом. Среди всех движений заряженных центров, совместимых с законами классической динамики, будут возможными или стабильными только те, траектории которых удовлетворяют отношениям простых чисел. С другой стороны, Томсон и Эйнштейн для объяснения фотоэффекта, флуктуации излучения абсолютно черного тела считают необходимым допустить дискретную структуру излучения, которая, может быть сформирована из порций энергии излучения, величина которых пропорциональна частоте «кванта света».

Фундаментальная идея господина де Бройля заключается в том, чтобы объединить эти два представления, ассоциируя с каждой заряженной частицей, рассматриваемой как порция независимой энергии, периодическое явление с частотой, пропорциональной ее энергии, точно так же, как в гипотезе квантов света связываются периодические электромагнитные волны, в которых сконцентрирована энергия излучения. Таким образом, связь, установленная между движением частиц, заряженных или нейтральных (электрон или протон и квант света), со скоростью  $\beta c$  и периодическим явлением, распространяющимся со скоростью  $c/\beta$ , вытекает из общих принципов с помощью глубоких рассуждений, и, на первый взгляд, парадоксальная теория все более соответствует природе вещей и способна впечатляющим образом объединить концепции, которые до этого казались противоречивыми.

---

<sup>1</sup> Отзыв опубликован на фр. языке Фондом Луи де Бройля в кн.: L. de Broglie. Recherches sur la theorie des quanta. Fondation Louis de Broglie, Paris, 1992, p. 78. Пер. с фр. Смык А.Ф., Максименков П.П.

Автор показывает, в частности, что соотношения, введенные им между порциями энергии и распространением связанного с ними периодического процесса, имеют в точности такую же природу, что и соотношения, введенные лордом Рэлеем и Гоуи между движением группы волн и распространением фазы строго периодической волны. С другой стороны, и это может быть наиболее интересный момент, эта связь общими формулировками совпадает с глубокой аналогией между принципом Гамильтона и Мопертюи, который лежит в основе динамики, и принципом Ферма, подтвержденным принципом Гюйгенса-Френеля, который лежит в основе волновых представлений.

Автор показывает, что точно также, как принципы динамики материальной точки находят свое наиболее простое выражение путем введения вектора Вселенной, пространственные компоненты которого соответствуют количеству движения, а временная компонента - энергии, принцип Ферма и вся кинематика волн приводят к необходимости введения «вектора волны» Вселенной, пространственные компоненты которого определяют нормаль к волновой поверхности, а временная компонента - частоту.

Введение этих двух векторов необходимо, прежде всего, для того, чтобы обобщить квантовые соотношения и принцип относительности, а также уточнить периодический процесс, связанный с движением частицы, путем утверждения идентичности двух векторов: импульса Вселенной и волнового вектора. Или, точнее, при соответствующем выборе системы единиц, показать постоянство их отношения, которое равно постоянной Планка. Таким образом, расширяются квантовые соотношения, рассматриваемые до сих пор только для составляющих времени, энергии и частоты.

В этих условиях принципы Гамильтона и Ферма совпадают и представляют два аспекта одного и того же принципа. Может быть, в этом и заключается возможность волновой интерпретации принципов динамики. Во всяком случае, непосредственным следствием объединения двух векторов является то, что динамически возможные траектории частицы в силовом поле совпадают с лучами соответствующего периодического процесса.

Отсюда непосредственно выводятся динамические условия квантования Бора и Зоммерфельда, если предположить, что замкнутая орбита может быть стабильна только в том случае, когда волна, связанная с движущейся частицей вдоль той же траектории со скоростью, большей скорости частицы, должна находиться в фазе с ней. Это резонансное условие устойчивых траекторий для соответствующей волны дает в наиболее общей форме квантовые условия и дает весьма убедительное представление, несмотря на неясности физической природы периодического процесса, связанного с порцией электричества.

Применяя те же представления для случая газа в сосуде с отражающими стенками для связи с ассоциативными волнами, автор находит без всякой новой гипотезы выражение, данное Планком для постоянной энтропии, или химической постоянной газа. Понятие кванта света представляется здесь в форме, совершенно отличной от той, которую ей придаёт скорость света. Для де Бройля эти кванты являются незаряженными частицами энергии, движущимися менее быстро, в то время как волна распространяется более быстро, чем свет, с теми же соотношениями, что и в динамическом случае. Несмотря на трудности, которые поднимает эта концепция, замечательно, что она согласуется со всеми кинематическими и динамическими явлениями, касающимися распространения волн, эффекта Доплера, давления света, флуктуации излучения и закона излучения абсолютно черного тела в форме Планка.

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.

Подпись

П. Ланжевен

Диссертация блестяще защищена. Оценка очень высокая.

Подпись

Ж. Перрен

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

### **Библиография публикаций Луи де Бройля на русском языке**

1. Введение в волновую механику. – Харьков-Киев: Гос. научтехиздат. Украины, 1934. - 232 с.
2. Магнитный электрон (теория Дирака). – Харьков: ОНТИ-ДНТВУ-НКТП, 1936.
3. Электромагнитные волны в волноводах и полых резонаторах / пер. с фр. М.С. Головиной: под ред. В.Т. Овчарова. - М.: ИЛ, 1948. - 107 с.
4. По тропам науки / пер. с фр. С.Ф. Шушурин, ред. И.В. Кузнецов. – М.: ИЛ, 1962. - 408 с.
5. Революция в физике (Новая физика и кванты) / пер. с фр. С.П. Бакланова, Л.М. Коврижных, ред. М.К. Поливанов. - М.: Атомиздат, 1965. – 230 с.
6. Избранные статьи и речи. - М.: Наука, 1967. - 60 с.
7. Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики / предисл. Ж.Лошака; пер. с фр. Н.В. Самсоненко, под ред. Г.А. Зайцева. – М.: Мир, 1986. - 344 с.
8. Избранные научные труды. Т.1. – М.: Логос, 2010. - 556 с.
9. Избранные научные труды. Т.2. – М.: МГУП, 2011. - 618 с.
10. Избранные научные труды. Т.3. – М., 2013.

**ПРИЛОЖЕНИЕ 3**  
**Библиография трудов Луи де Бройля**  
*Статьи и доклады*

**1920**

1. О вычислении граничных частот  $K$  – и  $L$  – полос поглощения тяжелых элементов. Sur le calcul des fréquences limites d'absorption K et L des elements lourds // C.R., 1920. **170**. P. 585.
2. О поглощении X-лучей веществом. Sur l'absorption des rayons X par la matière // C.R., 1920. **171**. P. 1137.

**1921**

3. О модели атома Бора и о корпускулярных спектрах. Sur le modèle d'atome de Bohr et les spectres corpusculaires [en collaboration avec Maurice de Broglie] // C.R., 1921. **172**. P. 746.
4. Об электронной структуре тяжелых элементов. Sur la structure électronique des atoms lourds [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // C.R., 1921. **172**. P. 1650.
5. О распределении электронов в атомах тяжелых элементов. Sur la distribution des électrons dans les atoms lourds [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // C.R., 1921. **173**. P. 137.
6. О корпускулярном спектре элементов. Sur le spectre corpusculaire des elements [en collaboration avec Maurice de Broglie] // C.R., 1921. **173**. P. 527.
7. Об уменьшении частоты кванта в последовательных переходах с испусканием высокочастотного излучения. Sur la dégradation du quantum dans les transformations successives des radiations de haute fréquence // C.R., 1921. **173**. P. 1160.
8. О теории поглощения X лучей веществом и о принципе соответствия. Sur la théorie de l'absorption des rayons X par la matière et le principe de correspondance // C.R., 1921. **173**. P. 1456.

**1922**

9. X-лучи и термодинамическое равновесие. Rayons X et équilibre thermodynamique // Journal de Physique, 1922. - Serie VI. - V. III. - P. 33-45.
10. О спектре лучей Рентгена. Sur le système spectral des rayons Roentgen [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // C.R., 1922. **175**. P. 685.
11. Об аналогиях в структуре оптических серий и серии Рентгена. Sur les analogies de structure entre les séries optiques et les séries Roentgen [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // C.R., 1922. **175**. P. 755.
12. Излучение абсолютно черного тела и кванты света. Rayonnement noir et quanta de lumière // Journal de Physique, 1922. - Serie VI. - T. III. - P. 422-428.
13. Об интерференции и о теории квантов света. Sur les interferences et la théorie des quanta de lumière // C.R., 1922. **175**. P. 811.
14. Замечания о корпускулярных спектрах и о фотоэфекте. Remarques sur les spectres corpusculaires et l'effet photoélectrique [en collaboration avec Maurice de Broglie] // C.R., 1922. **172**. P. 1139.
15. Замечания о работе Е.Хмалмара, посвященной серии М элементов. Remarques sur le travail de E.Hjalmar concernant la série M des éléments [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // C.R., 1922. **175**. P. 1198.

**1923**

16. Волны и кванты. Ondes et quanta // C.R., 1923. **177**. P. 517.

17. Кванты света, дифракция и интерференция. Quanta de lumière, diffraction et interferences // C.R., 1923. **177**. P. 548.

18. Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма. Les quanta, la théorie cinétique des gaz et le principe de Fermat // C.R., 1923. **177**. P. 630.

19. Волны и кванты. Waves and quanta // Nature, 1923. 112 (2815). P. 540.

### 1924

20. О спектре X-лучей и о структуре атома. Sur le système spectral des rayons X et la structure de l'atome [en collaboration avec M.A. Dauvillier] // Journal de Physique, 1924. - Serie VI. - T.V. - P. 119.

21. Об экспериментальной проверке предсказаний теории Комптона и Дебая о вылете электронов при рассеянии X-лучей. Sur la verification expérimentale des projections d'électrons prévues lors de la diffusion des rayons X par les considerations de Compton et Debye [en collaboration avec Maurice de Broglie] // C.R., 1924. **178**. P. 383.

22. Попытка построения теории световых квантов. A tentative theory of light quanta // Philosophical Magazine, 1924. V. XLVII. P. 446-458.

23. Об общем определении понятия соответствия между волной и траекторией частицы. Sur la définition générale de la correspondance entre onde et movement // C.R., 1924. **179**. P. 39.

24. О теореме Бора. Sur un théorème de Bohr // C.R., 1924. **179**. P. 676-677.

25. О динамике квантов света и об интерференции. Sur la dynamique du quantum de lumière et les interferences // C.R., 1924. **179**. P. 1039-1040.

### 1925

26. О собственной частоте электрона. Sur la fréquence propre de l'électron // C.R., 1925. **180**. P. 498-500.

27. О физической интерпретации X-спектров жирных кислот. Sur l'interprétation physique des spectres X d'acides gras // C.R., 1925. **180**. P. 1485.

### 1926

28. Об аналогии между динамикой материальной точки и геометрической оптикой. Sur le parallelism entre la dynamique du point matériel et l'optique géométrique // Journal de Physique. 1926. Serie VI. T.VII. P. 1-6.

29. Замечания о новой волновой механике. Remarques sur la nouvelle mécanique ondulatoire // C.R., 1926. **183**. P. 272-274.

30. Принципы новой волновой механики. Les principes de la nouvelle mécanique ondulatoire // Journal de Physique. 1926. Serie VI. - T. VII. - P. 321-337.

31. О возможности увязывания явлений дифракции и интерференции с теорией квантов света. Sur la possibilité de relier les phénomènes d'interférences et de diffraction à la théorie des quanta de lumière // C.R., 1926. **183**. P. 447.

### 1927

32. О возможности согласования электромагнитной теории с новой волновой механикой. Sur la possibilité de mettre en accord la théorie électromagnétique avec la nouvelle mécanique ondulatoire // C.R., 1927. **184**. P. 81.

33. Корпускулярная структура вещества и излучения и волновая механика. La structure atomique de la matière et du rayonnement et la mécanique ondulatoire // C.R., 1927. **184**. P. 273.

34. Пятимерная Вселенная и волновая механика. L'Univers à cinq dimensions et la mécanique ondulatoire // Journal de Physique. 1927. Serie VI.- T. VIII. - P. 65-73.

35. Волновая механика и корпускулярная структура вещества и излучения. La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement // Journal de Physique. 1927. Serie VI. - T. VIII. - P. 225-241.

36. О роли непрерывности волн в волновой механике. Sur le rôle des ondes continues en mécanique ondulatoire // C.R., 1927. **185**. P. 380.

37. Доклад на Сольвеевском конгрессе по физике «Новая динамика квантов». Rapport au V Conseil de Physique Solvay sur la «Nouvelle dynamique des quanta». – Paris: Gauthier-Villars, 1927. P. 105.

38. Корпускула и волны  $\psi$ . Corpuscule et ondes  $\psi$  // C.R., 1927. - **185**. - P. 1180.

### 1930

39. Об уравнениях и общих концепциях волновой механики. Sur les équations et les conceptions générales de la mécanique ondulatoire // Bulletin de la Société mathématique de France, mai 1930.

### 1932

40. Замечания о первых интегралах в волновой механике. Remarques sur les intégrals premières en mécanique ondulatoire // C.R., 1932. - **194**. - P. 693.

41. О плотностях средних значений в теории Дирака. Sur les densités des valeurs moyennes dans la théorie de Dirac // C.R., 1932. - **194**. - P. 1062.

42. Об аналогии между электроном Дирака и электромагнитной волной. Sur une analogie entre l'électron de Dirac et l'onde électromagnétique // C.R., 1932. - **195**. - P. 536.

43. Замечания о магнитном и вращательном моментах электрона. Remarques sur le moment magnétique et le moment de rotation de l'électron // C.R., 1932. - **195**. - P. 577.

44. Об электромагнитном поле световой волны. Sur le champ électromagnétique de l'onde lumineuse // C.R., 1932. - **195**. - P. 862.

### 1933

45. О плотности энергии в теории света. Sur la densité de l'énergie dans la théorie de la lumière // C.R., 1933. - **197**. - P. 1377.

### 1934

46. О природе фотона. Sur la nature du photon // C.R., 1934. - **198**. - P. 135.

47. Некоторые замечания о теории магнитного электрона Дирака. Quelques remarques sur la théorie de l'électron magnétique de Dirac // Archives des sciences physiques et naturelles. 1934. V. XV. - P. 465.

48. Замечания о теории света. Remarques sur la théorie de la lumière // Mémoires de l'Académie royale des Sciences de Liège. 1934. - T. XIX.

49. Волновое уравнение фотона. L'équation d'ondes du photon // C.R., 1934. - **199**. - P. 445.

50. О спине фотона. Sur le spin du photon [en collaboration avec M.J. Winter] // C.R., 1934. - **199**. - P. 813.

51. О выражении плотности в новой теории фотонов. Sur l'expression de la densité dans la nouvelle théorie des photons // C.R., 1934. - **199**. - P. 1165.

### 1935

52. Одно замечание о взаимодействии вещества и электромагнитного поля. Une remarque sur l'interaction entre la matière et le champ électromagnétique // C.R., 1935. - **200**. - P. 361.

53. О теореме Кёнига в волновой механике. Sur le théorème de Koenig en mécanique ondulatoire [en collaboration avec M.J.-L.Destouches] // C.R., 1935. - **201**. - P. 369.

### 1936

54. О релятивистском преобразовании кинетического момента вращающегося тела. La variance relativiste du moment cinétique d'un corps en rotation // Journal des mathématiques pures et appliqués, 1936. - XV. - P. 89.

55. Теория фотона и релятивистская волновая механика систем. La théorie du photon et la mécanique ondulatoire relativiste des systèmes // C.R., 1936. - **203**. - P. 473.

### 1937

56. Последние теоретические концепции о свете. Les récentes conceptions théoriques sur la lumière // Annales de la Société scientifique de Bruxelles, 1937. - CL VII. – P. 99-119.

57. Квантование полей в теории фотона. La quantification des champs en théorie du photon // C.R., 1937. - **205**. - P. 345.

### 1939

58. Об одном случае редукции в волновой механике частиц со спином 1. Sur un cas de réductibilité en mécanique ondulatoire des particules de spin 1 // C.R., 1939. - **208**. - P. 1697.

59. О частицах с произвольным спином. Sur les particules de spin quelconque // C.R., 1939. - **209**. - P. 265.

### 1940

60. Реальные поля и комплексные поля в квантовой электромагнитной теории излучения. Champs reels et champs complexes en théorie électromagnétique quantique du rayonnement // C.R., 1940. - **211**. - P. 41.

### 1941

61. Об интерпретации некоторых уравнений в теории частиц со спином 2. Sur l'interprétation de certaines équations dans la théorie des particules de spin 2 // C.R., 1941. - **212**. - P. 657.

### 1942

62. О распространении световой энергии в анизотропных средах. Sur la propagation de l'énergie lumineuse dans les milieux anisotropes // C.R., 1942. - **215**. - P. 153.

### 1943

63. О предоставлении электромагнитных величин в квантовой теории полей и в волновой механике фотона. Sur la représentation des grandeurs électromagnétiques en théorie quantique des champs et en mécanique ondulatoire du photon // C.R., 1943. - **217**. - P. 89.

### 1944

64. Введение постоянных Кулона и Ньютона в волновую механику. L'introduction des constantes de Coulomb et de Newton en mécanique ondulatoire [en collaboration avec Mme Tonnelat] // C.R., 1944. - **218**. - P. 373.

65. Замечания о некоторых затруднениях в теории фотона, связанных с использованием решения с аннигиляцией. Remarques sur quelques difficultés de la

théorie du photon liées à l'emploi d'une solution d'annihilation [en collaboration avec Mme Tonnelat] // C.R., 1944. - **218**. - P. 889.

### 1946

66. Об одном эффекте, ограничивающем возможности корпускулярного микроскопа. Sur un effet limitant les possibilités du microscope corpusculaire // C.R., 1946. - **222**. - P. 1017.

67. Замечания по формуле Больцмана относительно периодических систем. Remarques sur la formule de Boltzmann relative aux systèmes périodiques // C.R., 1946. - **223**. - P. 298.

68. Об изучении очень мелких структур в корпускулярном микроскопе. Sur l'étude des très petites structures au microscope corpusculaire// C.R., 1946. - **223**. - P. 490.

69. О применении теоремы сложения вероятностей в волновой механике. Sur l'application du théorème des probabilités composites en mécanique ondulatoire // C.R., 1946. - **223**. - P. 874.

### 1947

70. Об электронах М. Тибо и возможном существовании очень маленького заряда у нейтрона. Sur les électrons de M. Thibaud et l'existence éventuelle d'une très petite charge du neutron // C.R., 1947. - **224**. - P. 615.

71. Когерентная диффузия и корпускулярный микроскоп. La diffusion cohérente et le microscope corpusculaire // C.R., 1947. - **224**. - P. 1743.

72. Принцип инерции энергии и понятие потенциальной энергии. Le principe d'inertie de l'énergie et la notion d'énergie potentielle // C.R., 1947. - **225**. - P. 163.

73. О частоте и фазовой скорости плоских монохроматических волн в волновой механике.Sur la fréquence et la vitesse de phase des ondes planes monochromatiques en mécanique ondulatoire // C.R., 1947. - **225**. - P. 361.

### 1948

74. О релятивистском изменении температуры. Sur la variance relativiste de la température // Cahiers de Physique, janvier 1948. - P. 1-11.

75. О статистике чистых случаев в волновой механике и интерференция вероятностей. Sur la statistique des cas purs en mécanique ondulatoire et l'interférence des probabilités // Revue Scientifique, 87 année, 1948. - P. 259.

76. О возможности обнаружения магнитного момента, свойственного частицам. Sur la possibilité de mettre en évidence le moment magnétique propre des particules à spin // C.R., 1948. - **226**. - P. 1765.

77. О возможности выявления магнитного момента, свойственного частицам со спином 1/2. Sur la possibilité de mettre en évidence le moment magnétique propre des particules à spin 1/2 // Journal de Physique, 1948. - Serie VIII. - T. IX. - P. 265.

### 1949

78. О классическом, чисто электромагнитном вычислении энергии и количества движения электрона. Sur le calcul classique de l'énergie et de la quantité de mouvement d'un électron purement électromagnétique // C.R., 1949. - **228**. - P. 1265.

79. Свободная энергия и функция Лагранжа. Применение к электромагнетизму и к взаимодействию между токами и постоянными магнитами. Energie libre et fonction de Lagrange. Application à l'électromagnétique et à l'interaction entre courants et aimants permanents // Portugalia Physica, 1949. III. - P. 1-20.

80. Проникновение электромагнитной волны в среду, в которой диэлектрическая постоянная изменяется линейно. Pénétration d'une onde électromagnétique

dans un milieu ou la constante diélectrique varie linéairement // Note préliminaire du Laboratoire national de radioélectricité, 1949. - N. 129.

81. О новой форме взаимодействия между электрическими зарядами электромагнитным полем. Sur une forme nouvelle de l'interaction entre les charges électriques et le champ électromagnétique // C.R., 1949. - **229**. - P. 157.

82. Новые замечания о взаимодействии электрического заряда с электромагнитным полем. Nouvelles remarques sur l'interaction entre une charge électrique et le champ électromagnétique // C.R., 1949. - **229**. - P. 269.

83. О теории вычитания полей. Sur la théorie du champ soustractif // C.R., 1949. - **229**. - P. 401.

84. О полях, создаваемых протоном и нейtronом. Sur les champs créés par le proton et par le neutron // C.R., 1949. - **229**. - P. 640.

85. Новая концепция взаимодействия электрических зарядов и электромагнитного поля. Une conception nouvelle de l'interaction entre les charges électriques et le champ électromagnétique // Portugalia Mathematica, 1949. - **8**. - P. 37-58.

## 1950

86. О мезонных полях, связанных с электроном в новой теории вычитания полей. Sur les champs mésoniques liés à l'électron dans la nouvelle théorie du champ soustractif [en collaboration avec M.Rene Reulos] // C.R., 1950. - **230**. - P. 1009.

87. О возможности сложной структуры для частиц со спином 1. Sur la possibilité d'une structure complexe pour les particules de spin 1 [en collaboration avec Mme M.-A.Tonnelat] // C.R., 1950. - **230**. - P. 1329.

88. Дополнительные замечания о сложной структуре частиц со спином 1. Remarques complémentaires sur la structure complexe des particules de spin 1 // C.R., 1950. - **230**. - P. 1434.

89. О сходимости интегралов в проблеме поляризации вакуума. Sur la convergence des intégrals dans le problème de la polarization du vide // C.R., 1950. - **230**. - P. 2061.

90. О новой форме теории компенсирующего поля. Sur une forme nouvelle de la théorie du champ soustractif // Journal de Physique, XI. 1950. P. 481.

## 1951

91. Лагранжева форма теории компенсирующего поля. Schéma lagrangien de la théorie du champ soustractif // C.R., 1951. - **232**. - P. 1269.

92. О возможности сложной структуры частиц со спином 1. Sur la possibilité d'une structure complexe des particules de spin 1 // Journal de Physique, XII. 1951. P. 509.

93. Некоторые соображения по калибровочным преобразованиям и определению тензоров Герца в теории максвелловской частицы со спином 1. Quelques considerations sur les transformations de jauge et la définition des tenseurs de Hertz en théorie du corpuscule maxwellien de spin 1 // C.R., 1951. - **232**. - P. 2056.

94. Замечания по теории волны-пилота. Remarques sur la théorie de l'onde pilote // C.R., 1951. - **233**. - P. 641.

## 1952

95. О тензоре энергии-импульса в теории компенсирующего поля. Sur le tenseur énergie-impulsion dans la théorie du champ soustractif // C.R., 1952. - **234**. - P. 20.

96. О возможности причинной и объективной интерпретации волновой механики. Sur la possibilité d'une interprétation causale et objective de la mécanique ondulatoire // C.R., 1952. - **234**. - P. 265.

97. О соотношениях между коэффициентами заряда и массы в теории компенсирующего поля. Sur les relations entre les coefficients de charge et de masse dans la théorie du champ soustractif // C.R., 1952. - **234.** - P. 1505.

98. О введении идей волны-пилота и двойного решения в теории электрона Дирака. Sur l'introduction des idées d'onde pilote et de double solution dans la théorie de l'électron de Dirac // C.R., 1952. - **235.** - P. 557.

99. Об интерпретации волновой механики систем частиц в пространстве конфигурации с помощью теории двойного решения. Sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules dans l'espace de configuration par la théorie de la double solution // C.R., 1952. - **235.** - P. 1345.

100. Волновая механика систем частиц одинаковой природы и теория двойного решения. La mécanique ondulatoire des systèmes de particules de même nature et la théorie de la double solution // C.R., 1952. - **235.** - P. 1453.

### 1953

101. Об интерпретации волновой механики с помощью волн с сингулярностями. Sur l'interprétation de la mécanique ondulatoire à l'aide d'ondes à région singulière // C.R., 1953. - **236.** - P. 1459.

102. О причинной и нелинейной интерпретации волновой механики. Sur l'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire // C.R., 1953. - **237.** - P. 441.

### 1954

103. Рассмотрения классической механики, подводящие к обоснованию волновой механики систем в теории двойного решения. Considerations de mécanique classique préparant la justification de la mécanique ondulatoire des systèmes dans la théorie de la double solution // C.R., 1954. - **239.** - P. 521.

104. Обоснование волновой механики систем в пространстве конфигураций с точки зрения двойного решения. Justification du point de la double solution de la mécanique ondulatoire des systèmes dans l'espace de configuration // C.R., 1954. - **239.** - P. 565.

105. Новый вывод формулы ведения в теории двойного решения. Une nouvelle démonstration de la formule du guidage dans la théorie de la double solution // C.R., 1954. - **239.** - P. 737.

### 1955

106. Регулярные волны и волны с сингулярностями в волновой механике. Ondes régulières et ondes à région singulière en mécanique ondulatoire // C.R., 1955. - **241.** - P. 345.

### 1956

107. Иллюстрация с помощью примера формы функций волны с сингулярностями в теории двойного решения. Illustration par un exemple de la forme des fonctions d'onde singulières de la théorie de la double solution // C.R., 1956. - **243.** - P. 617.

108. Физический смысл  $|\psi|^2$  для стационарных состояний для причинной интерпретации волновой механики. La signification du  $|\psi|^2$  pour les états stationnaires pour l'interprétation causale de la mécanique ondulatoire // C.R., 1954. - **239.** - P. 565.

### 1957

109. Новые идеи, касающиеся систем частиц, в причинной интерпретации волновой механики. Idées nouvelles concernant les systèmes de corpuscules dans

l'interprétation causale de la mécanique ondulatoire [en collaboration avec M. Joao Luis Andrade e Silva] // C.R., 1957. - **244**. - P. 529.

### 1958

110. Попытка согласования уравнения Гейзенберга и уравнения волны *и* в теории двойного решения. Tentative de raccord entre l'équation de Heisenberg et l'équation de l'onde *et* en théorie de la double solution // C.R., 1958. - **246**. - P. 2077.

111. О номенклатуре частиц. Sur la nomenclature des particules // C.R., 1958. - **247**. - P. 1069.

### 1959

112. Два замечания в связи с проблемой вращающегося диска в теории относительности. Deux remarques en relation avec le problème du disque tournant en théorie de la relativité // C.R., 1959. - **249**. - P. 1426.

113. Классические проблемы и билокальное представление ротатора Накано. Problèmes classiques et représentation bilocale du rotateur de Nakano [en collaboration avec M.M. Pierre Hillion et Jean-Pierre Vigier] // C.R., 1959. - **249**. - P. 2255.

114. Интерпретация волновой механики. L'interprétation de la mécanique ondulatoire // Journal de Physique, 1959. - 20. - P. 963.

### 1961

115. Термодинамика изолированной частицы. La thermodynamique de la particule isolée // C.R., 1961. - **253**. - P. 1078.

### 1962

116. Новое представление термодинамики изолированной частицы. Nouvelle présentation de la thermodynamique de la particule isolée // C.R., 1962. - **255**. - P. 87.

117. Некоторые следствия термодинамики изолированной частицы. Quelques conséquences de la thermodynamique de la particule isolée // C.R., 1962. - **255**. - P. 1052.

118. Замечания по интерпретации дуализма волн и частиц. Remarques sur l'interprétation de la dualité des ondes et des corpuscules // Cahiers de Physique, № 147, octobre 1962. - P. 425-445.

### 1963

119. Применение теории термоядерного синтеза к новой расширенной модели элементарных частиц. Application de la théorie de la fusion au nouveau modèle étendu des particules élémentaires [en collaboration avec M. Jean-Pierre Vigier] // C.R., 1963. - **256**. - P. 3390.

120. Таблица элементарных частиц в связи с новой моделью элементарных частиц. Table des particules élémentaires associées au nouveau modèle des particules élémentaires [en collaboration avec M. Jean-Pierre Vigier] // C.R., 1963. - **256**. - P. 3551.

121. О введении свободной энергии в скрытую термодинамику частиц. Sur l'introduction de l'énergie libre dans la thermodynamique cachée des particules// C.R., 1963. - **257**. - P. 1430.

122. О теории кинетических фокусов в термодинамике изолированной частицы. Sur la théorie des foyers cinétiques dans la thermodynamique de la particule isolée// C.R., 1963. - **257**. - P. 1822.

123. По поводу теории лазеров. Sur un point de la théorie des lasers (Communication à l'Académie des Sciences de Lisbonne, 21 novembre 1963).

## 1964

124. Скрытая термодинамика частиц. La thermodynamique cache des particules (Ann. Inst. H. Poincaré), 1964. №1. - Р. 1-19.

125. Электромагнитные волны и фотоны. Ondes électromagnétiques et photons // C.R., 1964. - **258**. - Р. 6345.

## 1965

126. О соотношении неопределенностей  $\delta T \delta \varphi \geq 2\pi$ . Sur la relation d'incertitude  $\delta T \delta \varphi \geq 2\pi$  // C.R., 1965. - **260**. - Р. 6041.

## 1966

127. О релятивистском преобразовании количества тепла и температуры и скрытая термодинамика частицы. Sur la transformation relativiste de la quantité de chaleur et de la température et la thermodynamique cachée de la particule // C.R., 1966. - **262**. Série B. - Р. 1235.

128. О смещении спектральных линий, испущенных удаленным астрономическим объектом. Sur le déplacement des raies émises par un objet astronomique lointain // C.R., 1966. - **263**. Série B. - Р. 589.

129. Об интерпретации оператора Гамильтона  $H$  и оператора «квадрата углового момента»  $M_{op}^2$  в квантовой механике. Sur l'interprétation de l'opérateur hamiltonien  $H$  et de l'opérateur «carré du moment angulaire»  $M_{op}^2$  de la mécanique quantique [en collaboration avec M. Joao Luis Andrade e Silva] // C.R., 1966. - **263**. Série A. - Р. 645.

## 1967

130. О формуле  $Q = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  и основах волновой механики. Sur la formule  $Q = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  et les bases de la mécanique ondulatoire // C.R., 1967. - **264**. Série B. - Р. 1041.

131. Броуновское движение некоторой частицы в своей волне. Le mouvement brownien d'une particule dans son onde // C.R., 1967. - **264**. Série B. - Р. 1043.

132. О динамике тел с переменной собственной массой и формула релятивистского преобразования теплоты. Sur la dynamique des corps à masse propre variable et la formule de transformation relativiste de la chaleur // C.R., 1967. - **264**. Série B. - Р. 1173.

133. Динамика ведения в преломляющей и дисперсионной среде и теория античастиц. La dynamique du guidage dans un milieu réfringent et dispersive et la théorie des antiparticules // Journal de Physique, 1967. - 28. - Р. 481.

134. Об уравнении  $\Delta W = \Delta Q + \Delta L$  в релятивистской термодинамике. Sur l'équation  $\Delta W = \Delta Q + \Delta L$  en thermodynamique relativiste // C.R., 1967. - **265**. Série B. - Р. 437.

135. О дискуссиях относительно формулы  $Q = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  и определение давления в релятивистской термодинамике. Sur les discussions relatives à la formule  $Q = Q_0 \sqrt{1 - \beta^2}$  et la définition de la pression en thermodynamique relativiste // C.R., 1967. - **265**. Série B. - Р. 889.

## 1968

136. О применении волновой механики в теории ведения волн. Sur l'application de la mécanique ondulatoire à la théorie des guides d'ondes // C.R., 1968. - **266**. Série B. - Р. 1233.

137. Релятивистская термодинамика и скрытая термодинамика частиц. La thermodynamique relativiste et la thermodynamique cache des particules // International Journal of Theoretical Physics, 1, n1, mai 1968. - P. 1-23.

138. Релятивистская термодинамика и волновая механика. Thermodynamique relativiste et mécanique ondulatoire // Ann. Inst. H. Poincaré, IX, n 2. - 1968. - P. 89-108.

139. Интерпретация последнего эксперимента по интерференции фотонных пучков. Interpretation of a recent experiment on interferences of photons beams // Physical Review, 1968. - **172**. - n 5. - P. 1284.

### 1969

140. Об интерпретации соотношений неопределенности. Sur l'interprétation des relations d'incertitude // C.R., 1969. - **268**. Série B. - P. 277.

141. О соударении частиц в волновой механике. Sur le choc des particules en mécanique ondulatoire [en collaboration avec M. Joao Luis Andrade e Silva] // C.R., 1969. - **268**. Série B. - P. 1449.

### 1970

142. О новом представлении формул волновой механики. Sur une nouvelle présentation des formules de la mécanique ondulatoire // C.R., 1970. - **271**. Série B. - P. 559.

### 1971

143. Спины и моменты количества движения. Spins et moments de quantité de mouvement // C.R., 1971. - **272**. Série B. - P. 349.

144. О проблеме движения частицы в преломляющей среде. Sur un problème du mouvement d'une particule dans un milieu réfringent // C.R., 1971. - **272**. Série B. - P. 1333.

### 1972

145. Масса фотона. Эффект Имбера и эффект Гуса-Ханшена в падающем поляризованном свете. Masse du photon. Effet Imbert et effet Goos-Hänchen en lumière incidente polarisée [en collaboration avec M.J.-P. Vigier] // C.R., 1972. - **273**. Série B. - P. 1069.

146. О распределении потенциалов взаимодействия между частицами системы. Sur la répartition des potentiels d'interaction entre les particules d'un système // C.R., 1972. - **275**. Série B. - P. 899.

### 1973

147. О действительных базовых идеях волновой механики. Sur les véritable idées de base de la mécanique ondulatoire // C.R., 1973. - **277**. Série B. - P. 71.

### 1974

148. Об опровержении теоремы Белла. Sur la réfutation du théorème de Bell // C.R., 1974. - **278**. Série B. - P. 721.

### 1976

149. Адиабатическая инвариантность и скрытая термодинамика частиц. L'invariance adiabatique et la thermodynamique cache des particules // Annales de la Fondation Louis de Broglie, 1, n 1, 1976. - P.1.

150. Существующие, предсказанные и скрытые квантовые вероятности. Present, predicted and hidden probabilities quantique [en collaboration avec M.G. Louchak, J.A. Beswick, J. Vassalo-Pereira] // Foundation of Physics, 1976. - **6**. - P. 3.

## *Монографии и сборники статей*

**1924**

1. Исследования по теории квантов. Докторская диссертация. Recherches sur la théorie des quanta. Thèse de doctorat soutenue à Paris le 25 novembre 1924.

**1926**

2. Волны и движения. Ondes et mouvements. – Paris: Gauthier-Villars, 1926.

**1928**

3. Введение в физику X-лучей. Introduction à la physique des rayons X et γ. [en collaboration avec M. Maurice de Broglie]. - Paris: Gauthier-Villars, 1928.

4. Волновая механика. La mécanique ondulatoire – Mémorial des Sciences physiques, fascicule I, Paris: Gauthier-Villars, 1928.

5. Избранные статьи по волновой механике. Selected papers on wave mechanics [en collaboration avec M. Léon Brillouin]. – Glasgow: Blackie and Son, 1928.

**1930**

6. Волны и частицы. Ondes et corpuscules. – Paris: Hermann, 1930.

7. Введение в волновую механику. Introduction à l'étude de la mécanique ondulatoire. - Paris: Hermann, 1930.

**1932**

8. Теория квантования в новой механике. Théorie de la quantification dans la nouvelle mécanique. - Paris: Hermann, 1932.

9. Об ограниченной форме соотношений неопределенностей. Sur une forme plus restrictive des relations d'incertitude. - Paris: Hermann, 1932.

10. Прождение заряженных частиц через потенциальные барьеры. Le passage des corpuscules électrisés à travers les barrières de potential. Annales de l'Institut Henri Poincaré, III, 1932-1933, p. 339-446.

**1934**

11. Магнитный электрон. L'électron magnétique. - Paris:Hermann, 1934.

12. Новая теория света. Une nouvelle conception de la lumière. - Paris: Hermann, 1934.

**1936**

13. Новые исследования по теории света. Nouvelles recherché sur la lumière. - Paris: Hermann, 1936.

**1938**

14. Принцип соответствия и взаимодействие между веществом и излучением. Le principe de correspondence et les interactions entre la matière et le rayonnement. - Paris: Hermann, 1938.

**1939**

15. Волновая механика системы частиц. La mécanique ondulatoire des systèmes de corpuscules. - Paris: Gauthier-Villars, 1939.

**1940**

16. Новая теория света, волновая механика фотона. Т. 1. Свет в пустоте. Т. 2. Взаимодействие фотонов с веществом. Une nouvelle théorie de la lumière, la

механике волнового распространения электромагнитных волн. Problèmes de propagation guidée des ondes électromagnétiques. - Paris: Gauthier-Villars, 1941.

### 1941

17. Проблемы направленного распространения электромагнитных волн. Problèmes de propagation guidée des ondes électromagnétiques. - Paris: Gauthier-Villars, 1941.

### 1943

18. Общая теория частиц со спином. Théorie générale des particules à spin. - Paris: Gauthier-Villars, 1943.

19. О волновой механике в теории ядра. De la mécanique ondulatoire à la théorie du noyau. T. 1. - Paris: Hermann, 1943. T. 2. - Paris: Hermann, 1945. T. 3. - Paris: Hermann, 1946.

20. Частицы, волны и волновая механика. Corpuscules, ondes et mécanique ondulatoire. - Paris: Albin-Michel, 1943.

### 1949

21. Волновая механика фотона и квантовая теория полей. Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs. - Paris: Gauthier-Villars, 1949.

### 1950

22. Волновая и корпускулярная оптика. Optique ondulatoire et corpusculaire. - Paris: Hermann, 1950.

### 1951

23. Теория частиц со спином  $\frac{1}{2}$  (Электроны Дирака). La Théorie des particules de spin  $\frac{1}{2}$  (Electrons de Dirac). - Paris: Gauthier-Villars, 1951.

### 1953

24. Элементы квантовой теории и волновой механики. Eléments de théorie des quanta et de mécanique ondulatoire. - Paris: Gauthier-Villars, 1953.

25. Останется ли квантовая физика индетерминистской? La physique quantique restera-t-elle indéterministe? [en collaboration avec M.Jean-Pierre Vigier]. - Paris: Gauthier-Villars, 1953.

### 1956

26. Предварительная интерпретация причинной и нелинейной волновой механики: теория двойного решения. Une tentative d'interprétation causale et non linéaire de la mécanique ondulatoire: la théorie de la double solution. - Paris: Gauthier-Villars, 1956.

### 1957

27. Теория измерений в волновой механике (обычная интерпретация и причинная интерпретация). La théorie de la mesure en mécanique ondulatoire (interprétation usuelle et interprétation causale). - Paris: Gauthier-Villars, 1957.

### 1961

28. Новая теория частиц М.М. Жан-Пьер Вижье и его сотрудников. La nouvelle théorie des particules de MM. Jean-Pierre Vigier et de ses collaborateurs. - Paris: Gauthier-Villars, 1961.

**1963**

29. Критическое исследование основ существующей интерпретации волновой механики. *Etude critique des bases de l'interpretation actuelle de la mécanique ondulatoire.* - Paris: Gauthier-Villars, 1963.

**1964**

30. Термодинамика изолированной частицы. *La thermodynamique de la particule isolée (thermodynamique cache des particules).* - Paris: Gauthier-Villars, 1964.

**1968**

31. Электромагнитные волны и фотоны. *Ondes électromagnétiques et photons.* - Paris: Gauthier-Villars, 1968.

**1971**

32. Переосмысление волновой механики. *La reinterpretation de la mécanique ondulatoire [en collaboration avec J.L. Andrade e Silva ].* - Paris: Gauthier-Villars, 1971.

**1978**

33. Основы новой микрофизики. *Jalons pour une nouvelle microphysique.* - Paris: Gauthier-Villars, 1978.

### **Работы по философии естествознания**

**1937**

1. Новая физика и кванты. *La physique nouvelle et les quanta.* - Paris: Flammarion, 1937.

2. Материя и свет. *Matière et lumière.* - Paris: Albin-Michel, 1937.

**1941**

3. Непрерывное и дискретное в современной физике. *Continu et discontinu en physique modern.* - Paris: Albin-Michel, 1941.

**1947**

4. Физика и микрофизика. *Physique et microphysique.* - Paris: Albin-Michel, 1947.

**1951**

5. Ученые и открытия. *Savants et découvertes.* - Paris: Albin-Michel, 1951.

**1956**

6. Новые перспективы в микрофизике. *Perspectives nouvelles en microphysique.* - Paris: Albin-Michel, 1956.

**1960**

7. По тропам науки. *Sur les sentiers de la science.* – Paris: Albin-Michel, 1960.

**1966**

8. Определенности и неопределенности в науке. *Certitudes et incertitudes de la science.* – Paris: Albin-Michel, 1966.

**1976**

9. Полувековые исследования. *Recherches d'un demi-siècle.* - Paris: Albin-Michel, 1976.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### Хронология истории создания квантовой механики

<p>1900 – М. Планк предложил рассматривать энергию в виде «вполне определенного числа конечных равных частей и использовать природную константу <math>h = 6,55 \cdot 10^{-27}</math> эрг · с. Эта константа, будучи умножена на частоту резонаторов, дает значение элемента энергии»</p>		
Процессы взаимодействия света с веществом		Процессы, происходящие внутри атома
А. Эйнштейн «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света»: ввел понятие кванта света для объяснения фотоэффекта	1905	
А. Эйнштейн «К современному состоянию проблемы излучения»: неизбежность дуализма света	1907	
	1909	<p>А. Эйнштейн «Теория теплоемкости твердых тел»: показал применимость квантовых понятий в молекулярной кинетической теории</p> <p>Опыты Э. Резерфорда по установлению строения атома</p>
1911 - Первый Сольвеевский конгресс, посвященный «Теории излучения и квантам», завершил первый этап развития учения о квантах		
	1913	<p>Н. Бор «О строении атомов и молекул»: стабильность стационарных состояний в атоме связал с константой <math>h</math></p>
	1914	<p>Присуждение Нобелевской премии М. фон Лауэ за открытие дифракции рентгеновских лучей на кристаллах</p> <p>Опыты Дж. Франка и Г. Герца подтвердили существование энергетических уровней в атомах</p>
Опыты Р. Милликена, подтвердили формулу фотоэффекта Эйнштейна	1916	
	1918	<p>Н. Бор «О квантовой теории линейчатых спектров»: сформулировал принцип соответствия - квантовая теория содержит классическую механику в качестве предельного случая</p>

A. Комpton изучил рассеяние излучения на свободных электронах, подтвердил существование квантов света	1923	
Л. де Бройль выдвинул идею фазовых волн, связанных с движением электрона, объяснил существование стационарных орбит в атоме Бора		
Диссертация Л. де Бройля «Иследования по теории квантов»: корпускулярно-волновой дуализм материи	1924	Н. Бор, Х. Крамерс, Д. Слетер «Квантовая теория излучения»: объяснение взаимодействия электронов в атоме посредством виртуального поля, не несущего ни энергии, ни импульса, но ответственного за статистическое сохранение энергии и импульса
Ш. Бозе «Закон Планка и гипотеза световых квантов»: ввел статистику, в которой световые кванты принципиально неразличимы		Н. Бор «О квантовой механике»: впервые ввел термин «квантовая механика»
		Принцип запрета Паули: два электрона в центральном поле никогда не могут находиться в состояниях, имеющих одни и те же четыре квантовых числа
А. Эйнштейн «Квантовая теория одноатомного идеального газа. Второе сообщение»: статистика Бозе-Эйнштейна	1925	В. Гейзенберг «О квантово-теоретическом истолковании кинематических и механических соотношений»: цель «установление базы теоретической квантовой механики, основанной исключительно на соотношениях между величинами, которые принципиально наблюдаемы»
В. Эльзассер предположил, что в опытах по изучению отражения от металлических поверхностей наблюдается дифракция волн де Бройля		Д.Ю. Уленбек и С.А. Гаудсмит ввели понятие спина электрона
Серия статей Э. Шредингера об атоме водорода «Квантование как задача о собственных значениях» завершили создание законченного математического аппарата волновой механики		
М. Борн «Квантовая механика процессов столкновений»: дал статистическую интерпретацию волн де Бройля	1926	
Э. Шредингер показал эквивалентность матричной и волновой механики		

Эксперименты К.Дж. Дэвиссона и Л.Х. Джермера, Дж.П. Томсона по наблюдению дифракции электронов	1927	В. Гейзенберг «О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики»: выдвинул принцип неопределенности, объяснил вероятностный характер квантово-механических расчетов, причиной которого является корпускулярно-волновой дуализм, присущий микрообъектам Н. Бор «Квантовый постулат и новейшее развитие атомной теории»: предложил принцип дополнительности - понятия волны и частицы взаимно исключают друг друга, и это не допускает причинного пространственно-временного описания
1927 - Пятый Сольвеевский конгресс, с темой «Электроны и фотоны», на котором был признан квантово-механический формализм и его вероятностная интерпретация		

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Хронология жизни Луи де Бройля

<b>15 августа 1892</b>	Родился Луи де Бройль
<b>1908</b>	Окончил лицей Жансон –де –Сайи в Париже
<b>1910</b>	Окончил факультет искусств и литературы Парижского университета, степень бакалавра
<b>1911</b>	Первый Сольвеевский конгресс по физике «Теория излучения и кванты». Принято решение заниматься физикой
<b>1913</b>	Получена ученая степень по физике на факультете естественных наук Парижского университета
<b>1913-1919</b>	Призван на военную службу и зачислен во французский инженерный корпус
<b>1919</b>	Начало работы в лаборатории брата М. де Бройля над проблемами X-лучей
<b>1923</b>	Опубликованы 3 статьи в Докладах Французской Академии наук: «Волны и кванты», «Кванты света. Дифракция и интерференция», «Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма», в которых впервые формулируется идея фазовой волны электрона
<b>1924</b>	Зашел докторскую диссертацию «Исследования по квантовой теории» на факультете естественных наук Парижского университета

<b>1927</b>	Опубликована теория двойного решения в статье «Корпускулярная структура вещества и излучения и волновая механика». Волновое поведение материи получило экспериментальное подтверждение в исследованиях К.Дж. Дэвиссона и Л.Х. Джермера в Америке, Дж.П. Томсона в Англии Выступление с докладом на Пятом Сольвеевском конгрессе, присоединение к вероятностной интерпретации квантовой механики
<b>1928</b>	Приступил к преподавательской деятельности, профессор на кафедре теоретической физики Института Анри Пуанкаре
<b>1929</b>	Удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие волновой природы электронов»
<b>1930</b>	Организовал научный семинар в Институте Анри Пуанкаре, который существовал на протяжении 40 лет. Организовал выпуск научной литературы в серии «Проблемы теоретической физики» в издательстве «Германн»
<b>1933</b>	Избран членом Французской академии наук
<b>1942</b>	Избран постоянным секретарем Французской академии наук
<b>1943</b>	Основал Центр исследований по прикладной математике при Институте Анри Пуанкаре
<b>1945</b>	Назначен советником при французской Высшей комиссии по атомной энергии
<b>1949</b>	Выдвинул идею создания Европейского центра ядерных исследований (CERN)
<b>1952-1976</b>	Возвращается к первоначальным идеям молодости, связанным с теорией двойного решения. Пытается создать детерминистскую интерпретацию квантовой механики. Публикует серию монографий: «Теория измерений в волновой механике», «Термодинамика изолированной частицы», «Вехи новой микрофизики», «Исследования в течение полувека»
<b>19 марта 1987</b>	Скончался в Париже

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андраде э Сильва Ж., Лошак Ж. Поля. Частицы. Кванты. - М.: Наука, 1972. - 192 с.
2. Андреев Н.Н. Элементы волновой механики // УФН, 1927. - Т. 7. - В. 1. - С. 25-46.
3. Алексеев И.С., Овчинников Н.Ф., Печенкин А.А. Методология обоснования квантовой теории.- М.: Наука, 1984. - 332 с.
4. Абрагам А. Время вспять или физик, физик, где ты был. – М.: Наука, 1992. – 392 с.
5. Бернштейн М. О письме Эйнштейна Жаку Адамару / Эйнштейновский сборник 1967.- М.: Наука, 1967. - С. 30-44.
6. Бозе С.Н. Закон Планка и гипотеза световых квантов // Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3.- М.: Наука, 1966. - С. 475-478.
7. Блауберг И.И. Эпистемология Бергсона в оценках западных исследователей // Эпистемология и философия науки, 2012.- Т. 34.- В. 4. - С. 204-211.
8. Бом Д. Причинность и случайность в современной физике. - М.: КРАСАНД, 2010. - 248 с.
9. Бор Н. О значении довоенных Сольвеевских конгрессов по физике // УФН, 1967. - Т. 91. - В. 4.- С. 737-753.
10. Бор Н. Избранные научные труды. Т. 1. Статьи 1909-1925. - М.: Наука, 1970. - 570 с.
11. Борн М. Квантовая механика процессов столкновений // УФН, 1977. - Т. 122. - В. 4. - С. 632-651.
12. Борн М. Эйнштейн и световые кванты // УФН, 1956. - Т. 59. - В. 1. - С. 119-134.
13. Бройль Л., де. Альберт Эйнштейн и сосуществование волн и корпускул / От многообразия к единству. Дискуссия // Эйнштейновский сборник 1969-1970. - М.: Наука, 1970. - С. 230-239.
14. Бройль Л., де. По тропам науки. - М.: Изд. иностр. лит., 1962. - 408 с.
15. Бройль Л., де. Теории современной физики и идеи Бергсона о времени и движении // Эпистемология и философия науки, 2012. - Т. 34. - В. 4. - С. 212-225.
16. Бройль Л., де. Революция в физике (Новая физика и кванты). – М.: Атомиздат, 1965. – 230 с.
17. Бройль Л., де. Соотношение неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация квантовой механики (С критическими замечаниями автора.) Предисл. и дополняющие замечания Ж. Лошака. - М.: Мир, 1986. - 344 с.
18. Бройль Л., де. Попытка построения теории световых квантов // УФН. - 1977. - Т. 122. - В. 8. - С. 562-571.
19. Бройль Л., де. К истории возникновения и интерпретации волновой механики // ВИЕТ - 1974. - В. 2-3. - С. 3-8.
20. Бройль Л., де, Лошак Ж. Теория двойного решения // Техника-молодежи, 1965. - №5. - С. 14-18.
21. Бройль Л., де. Останется ли квантовая механика индетерминистской? // Вопросы философии, 1954. - С. 105-118.
22. Бройль Л., де. Введение в волновую механику. Под ред. Д.Д. Иваненко. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. - 232 с.
23. Бройль Л., де. Исследования по теории квантов / Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. – М.: Логос, 2010. - С. 253-324.
24. Бройль Л., де. Волны и кванты / Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. – М.: Логос, 2010. - С. 193-195.
25. Бройль Л., де. Волны и кванты // УФН, 1967. - Т. 93. - В. 1. - С. 178-180.
26. Бройль Л., де. Кванты света. Дифракция и интерференция / Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. – М.: Логос, 2010. - С. 196-197.
27. Бройль Л., де. Кванты света, дифракция и интерференция // УФН, 1967. - Т. 93. - В. 1. - С. 180-181.

28. Бройль Л., де. Кванты, кинетическая теория газов и принцип Ферма / Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. – М.: Логос, 2010. - С. 198-200.
29. Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. – М.: Логос, 2010. - 554 с.
30. Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 2. – М.: МГУП, 2011. - 618 с.
31. Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 3. – М.: Наука, 2013. - 502 с.
32. Бройль Л., де. Анри Пуанкаре, его жизнь и деятельность // Пуанкаре А. Избранные труды в трех томах. Т. 3. – М.: Наука, 1974. – С. 703-714.
33. Бурсиан В.Р. Волновая механика Шредингера / Основания новой квантовой механики: Сборник статей. - М.; Л.: Гос. изд-во, 1927. - С. 53-82.
34. Вавилов С.И. Атомы и электроны. Доклады и прения на 3-ем физическом конгрессе Института Сольвэ // УФН, 1924. - Т. 4. - В. 4. - С. 102-104.
35. Вавилов С.И. Действия света и теория квантов // УФН, 1924. - Т. 4. - В. 1. - С. 36-61.
36. Вавилов С.И. Библиография. Луи де Бройль. Введение в волновую механику // УФН, 1929. - Т. 9. - В. 4. - С. 538.
37. Вавилов С.И. Исаак Ньютон. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. - 294 с.
38. Вариационные принципы механики / Ред., послесловие и примеч. Л.С. Полака. - М.: Физматлит, 1959. - 932 с.
39. Визгин В.П. «Французская революция» в физике // Исслед. по истор. физ. и мех. 1995-1997. – М.: Наука, 1999. – С. 15-38.
40. Визгин В.П. Восприятие волновой механики Шредингера в СССР / Эйнштейновский сборник 1986-1990. - М.: Наука. - 1990. – С. 446-477.
41. Визгин В.П. Единые теории поля и квантовая механика // 50 лет квантовой механики / Под общ. ред. Л.С. Полака. - М.: Наука, 1979. - С. 82-94.
42. Воспоминания о И.Е.Тамме. Отв. ред. Е.Л. Фейнберг. 3-е изд. – М.: ИздАТ, 1995. - 279 с.
43. Гааз А. Волны материи и квантовая механика. - М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. - 169 с.
44. Гейзенберг В. Жизнь в физике // УФН, 1970. - Т. 102. - В. 2. - С. 303-312.
45. Гинзбург В.Л. К столетнему юбилею квантовой теории (несколько замечаний) / 100 лет квантовой теории. История. Физика. Философия. Труды межд. конф. – М.: НИА-Природа, 2002. - С. 5-9.
46. Гинзбург В.Л. Как и кто создал теорию относительности? / Эйнштейновский сборник. 1974. - М.: Наука, 1976. - С. 351-384.
47. Герц Г. Из первых лет квантовой физики // УФН, 1977. - Т. 122. - В. 8.- С. 497-511.
48. Глаубер Р.Д. Сто лет квантам света. Нобелевская лекция 8 декабря 2005 г. // УФН, 2006. - Т. 176. - №12. - С. 1342-1352.
49. 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. Пер. Н. Фредерикс. - М.-Л.: ОНТИ, 1935. - 172 с.
50. Данин Д. Вероятностный мир. - М.: Знание, 1981. - 208 с.
51. Демуцкий В.П., Половин Р.В. Концептуальные вопросы квантовой механики // УФН, 1992. - Т. 162. - В. 10. - С. 95-180.
52. Декарт Р. Избранные произведения. - М.-Л.: Гос. изд. полит. лит., 1950. - 712 с.
53. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. - М.: Мир, 1985. – 380 с.
54. Дарроу К.К. Введение в волновую механику Шредингера // УФН, 1929. - Т. IX. - В. 4. - С. 437-514.
55. Дирак П.А.М. Релятивистское волновое уравнение электрона // УФН, 1979. - Т. 129. - В. 4. - С. 681-691.

56. Дирак П.А.М. Собрание научных трудов (в 4-х томах). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002-2005.
57. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики. С начала XIX до середины XX века. - М.: Изд-во ЛКИ, 2011. - 320 с.
58. Дэвиссон К.Д. Волны или электроны? // УФН, 1928. - Т. VIII. - В. 4. - С. 483-509.
59. Ельяшевич М.А. От возникновения квантовых представлений до становления квантовой механики // УФН, 1977. - Т. 122. - В. 8. - С. 679-717.
60. Ельяшевич М.А. Вклад Эйнштейна в развитие квантовых представлений // УФН, 1979. - Т. 128. - В. 3. - С. 503 -536.
61. Зайцев Г.А. Переосмысление волновой механики // Новые книги за рубежом, 1973. - Сер. А. - №5.- С. 53-55.
62. Зоммерфельд А. Пути познания в физике. Сборник статей / Ред. Я.А. Смородинский. - М.: Наука, 1973. - 319 с.
63. Иваненко Д.Д. Международный конгресс по элементарным частицам в Италии // УФН, 1958. - Т. 115. - В. 2. - С. 331-349.
64. Иваненко Д.Д. Луи де Бройль // ВИЕТ, 1987. - В.3. - С. 166-168.
65. Иваненко Д., Ландау Л. Замечание к работе К.Н. Шапошникова «Новый принцип динамики световых квантов» // Ж.Р.Ф.-Х.О, 1927. – Т. 59. - В. 1. - С. 113-114.
66. Иваненко Д., Ландау Л. Связь волновой механики с классической // Ж.Р.Ф.-Х.О., 1927. - Т. 59. - В. 2. - С. 253-260.
67. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. – М.: Наука, 1981. - 495 с.
68. Клейн Б. В поисках. Физики и квантовая теория. М.: Атомиздат, 1971. - 288 с.
69. Клейн М.Д. Эйнштейн и дуализм волны-частицы / Эйнштейновский сборник 1966. - М.: Наука, 1966. - С. 212-258.
70. Клейн М.Д. Первая работа Эйнштейна по квантам / Эйнштейновский сборник 1966. - М.: Наука, 1966. - С. 259-283.
71. Клейн М.Д. Эйнштейн, удельная теплоемкость и ранняя квантовая теория / Эйнштейновский сборник 1974. - М.: Наука, 1976. - С. 156-178.
72. Клейн М.Д. Макс Планк и начало квантовой теории // УФН, 1967. - Т. 92. - В. 4. - С. 679-700.
73. Клейн Ф. О новых английских работах по механике / Вариационные принципы механики. Под ред. Л.С. Полака. М., 1959. - С. 513-514.
74. Кобзарев И.Ю., Окунь Л.Б. О массе фотона // УФН, 1968. - Т. 95. - В. 1. - С. 132-137.
75. Кожевников А.Б., Новик А.Б. Анализ динамики информационных процессов в ранней квантовой механике (1925-1927). Препринт №7. - М.: Институт истории естествознания и техники АН СССР, 1987. - 43 с.
76. Кожевников А.Б. Эйнштейновская формула флуктуаций и корпускулярно-волновой дуализм / Эйнштейновский сборник 1986-1990. - М.: Наука, 1990. - С. 102-124.
77. Койре А. Очерки истории философской мысли. - М.: Прогресс, 1985. - 286 с.
78. Комpton А. Рассеяние рентгеновских лучей как частиц / Эйнштейновский сборник 1986-1990. - М.: Наука, 1990. - С. 398-404.
79. Кравец Т.П. VI Всесоюзный съезд физиков // Природа, 1928. - №10. - С. 914-919.
80. Крутков Ю.А. О теории квантов // ЖРФХО, 1916. - Т. 48. - В. 2. - С. 43-76.
81. Крутков Ю.А. Гипотеза независимых квантов ведет к спектральной формуле Вина // Ж.Р.Ф.-Х.О., 1914. – Т. 46. - В. 1. - С. 12-16.
82. Крутков Ю.А. Принцип аналогии Бора в теории квантов // УФН, 1921. - Т. 2. - В. 2. - С. 272-276.
83. Кудрявцев П.С. Становление советской физики // Основатели советской физики. - М.: Просвещение, 1970. - С. 5-84.

84. Кузнецов Б.Г. Очерки физической атомистики XX века. - М.: Наука, 1966. - 192 с.
85. Кузнецов Б.Г. Принцип дополнительности. - М.: Издательство ЛКИ, 2007. - 96 с.
86. Кузнецов Б.Г. Эйнштейн. Жизнь. Смерть. Бессмертие. - М.: Наука, 1980. - 675 с.
87. Кузнецов Б.Г. Эйнштейн и де Бройль. Историко-философские и историко-научные заметки // ВИЕТ, 1982. - Т. 1. - С. 47-59.
88. Кузнецов Б.Г. Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки. - М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. - 520 с.
89. Кузнецов Б.Г. Беседа с Луи де Бройлем // Вестник АН СССР. - 1982. - Т. 8. - С. 88-107.
90. Кузнецов Б.Г. Луи де Бройль / Б.Г. Кузнецов. Встречи. - М.: Наука, 1984. - С. 77-86.
91. Кузнецов Б.Г. Личное и величное / Воспоминания о И.Е. Тамме. - М.: ИздАТ, 1995. - С. 213-219.
92. Кузнецов Б.Г., Погребысский И.Б. Французская наука и современная физика. - М.: Наука, 1967. - 80 с.
93. Кузнецов Б.Г. Эволюция картины мира. - М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2010. - 352 с.
94. Кузнецов Б.Г. Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии. - М.: Мзд-во АН СССР, 1957. - 329 с.
95. Кузнецов Б.Г. Идеалы современной науки. - М.: Наука, 1983. - 255 с.
96. Куанова Е.Е. Концепция фотона и современные эксперименты по интерференции света / История и методология естественных наук. - М.: МГУ, 1978. Вып. XIX. Физика. С.116-122.
97. Ландсберг Г.С. Гипотеза световых квантов / Наука XX века. Физика. Сборник статей. - Л.: Гос. изд-во, 1929. - С. 88-130.
98. Ландсберг Г.С. Огюстен Френель. Очерк жизни и деятельности / Френель О. Избранные труды по оптике. Под ред. Г.С. Ландсбера. - М.: Гостехтеоретиздат, 1955. - С. 7-69.
99. Ландсберг Г.С. О квантовой теории излучения // УФН, 1924. – Т. IV. – В. 4-5. - С. 333-335.
100. Ланцош К. Вариационные принципы механики. - М.: Мир, 1965. - 406 с.
101. Лауз М. История физики. - М.: Гос. изд.-во технико-теоретической лит., 1956. - 230 с.
102. Лошак Ж. Геометризация физики. Пер. с фр. А.И. Пигалева. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. - 280 с.
103. Лошак Ж. Наука и тень. Пер. с фр. А.И. Пигалева. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. - 264 с.
104. Лошак Ж. Принц в науке / Бройль Л., де. Избранные научные труды. Т. 1. - М.: Логос, 2010. - С. 11-178.
105. Льоцци М. История физики. - М.: Мир, 1970. - 464 с.
106. Методологические принципы физики. История и современность / Под ред. Кедрова Б.М., Овчинникова Н.Ф. – М.: Наука, 1975. - 512 с.
107. Мехра Дж. Рождение квантовой механики // УФН, 1977. - Т. 122. - В. 4. - С. 719-744.
108. Менский Н.Б. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов // УФН, 2000. - Т. 170. - В. 3. - С. 631-648.
109. Милантьев В.П. История возникновения квантовой механики и развитие представлений об атоме. - М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2009. - 248 с.
110. Милантьев В.П. Сто лет квантам света // УФН, 2005. - Т. 175. - №11. - С. 1233-1242.

111. Мопертюи П. Согласование различных законов природы, которые до сих пор казались несовместимыми // Вариационные принципы механики / Ред. Л.С. Полак. - М.: Физматлит, 1959. - С. 23-30.
112. Нахмансон Р.С. Физическая интерпретация квантовой механики // УФН, 2001. - Т. 171. - В. 4. - С. 441-444.
113. Ньютона И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света / Творцы физической оптики. Отв. ред. В.И. Родичев. – М.: Наука, 1973. - С. 36-66.
114. Окунь Л.Б. Азы физики. Очень краткий путеводитель. - М.: Физматлит, 2012. - 168 с.
115. Очерки развития основных физических идей / Под ред. А.Т. Григоряна и Л.С. Полака. - М.: АН СССР, 1959. - 512 с.
116. Основания новой квантовой механики: Сборник статей / Под ред. и с предисл. акад. А.Ф. Иоффе. - М., Л.: Гос. изд-во, 1927. - 127 с.
117. Пайс А. Гении науки. - М.: Институт компьютерных исследований, 2002. - 448 с.
118. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. - М.: Наука, 1989. - 568 с.
119. Панет Ф. Об элементе 72 (гафний) // УФН, 1924. - Т. 4. - В. 1. – С. 80-94.
120. Переписка А. Эйнштейна и М. Бессо, 1903-1955 / Эйнштейновский сборник, 1974. - М.: Наука, 1976. - С. 5-112.
121. Планк М. Научная автобиография // УФН, 1958. - Т. 64. - В. 4.- С. 625-637.
122. Погребысский И.Б. Век разума / От Лагранжа к Эйнштейну. - М.: «Янус», 1996. - С. 346-365.
123. Полак Л.С. Возникновение волнового аспекта квантовой механики // 50 лет квантовой механики / Под общ. ред. Л.С. Полака. - М.: Наука, 1979. - С. 32-82.
124. Полак Л.С. Эрвин Шредингер и возникновение квантовой механики / Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - С. 347-392.
125. Полак Л.С. Возникновение квантовой физики / Очерки развития основных физических идей. - М.: Изд. АН СССР, 1959. - С. 323-389.
126. Полак Л.С. Из истории волновой теории света // ВИЕТ. - 1956. - В. 2.
127. Полак Л.С. Вариационные принципы механики: Их развитие и применения в физике. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. - 600 с.
128. Полак Л.С. Вариационные принципы, их развитие и некоторые применения в физике (1662-1926). Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. М., 1957.
129. Полищук Е.М. Эмиль Борель. – М.: Наука, 1980. - 169 с.
130. Попов М.А. В защиту квантового идеализма // УФН, 2003. - Т. 173. - В. 12. - С. 1382-1384.
131. Пуанкаре А. Избранные труды в трех томах. Т. 3. – М.: Наука, 1974. - 730 с.
132. Пуанкаре А. Наука и метод // А. Пуанкаре. О науке. - М.: Наука, 1983. - С. 284-403.
133. Пуанкаре А. Ценность науки // А. Пуанкаре. О науке. - М.: Наука, 1983. - С. 153-282.
134. Пуанкаре А. Современное состояние теоретической физики и ее перспективы // УФН, 1974. - Т. 113. - В. 4. - С. 663-677.
135. Пуанкаре А. Гипотеза квантов // Пуанкаре А. Избранные труды в трех томах. Т. 3. – М.: Наука, 1974. - С. 546-558.
136. Румер Ю.Б. Введение в волновую механику. - М.; Л.: ОНТИ, 1935. - 148 с.
137. Румер Ю.Б. Квантовая механика – 50 лет. - Новосибирск: Институт ядерной физики СО АН СССР, 1976. - 27 с.

138. Садбери А. Квантовая механика и физика элементарных частиц. Т. 2. - М.: Мир, 1989.
139. Сарангов Ц.С., Спасский Б.И. Роль аналогий в открытии квантовой механики / История и методология естественных наук. Выпуск 2. Физика. - М.: Изд-во МГУ, 1963. - С. 183-208.
140. Сексик Л. Эйнштейн. - М.: Молодая гвардия, 2012. - 270 с.
141. Спасский Б.И., Куканова Е.Е. Было ли представление о корпускулярно-волновом дуализме света у Ньютона и его последователей? Выпуск 21. Физика. – М.: Изд-во МГУ, 1979. - С. 76-83.
142. Севальников А.Ю. Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии. - М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2009. - 192 с.
143. Суворов С.Г. Вклад де Бройля в развитие физики (К публикации переводов статей де Бройля) // УФН. - 1967. - Т. 93. - В. 1. - С. 177.
144. Смородинский Я.А., Романовская Т.Б. Луи де Бройль // УФН. - 1988. - Т. 166. - В. 4. - С. 753-760.
145. Смык А.Ф., Уруцкоев Л.И. Великий физик XX века – Луи де Бройль (К выходу «Собрания избранных научных трудов Луи де Бройля» в 4-х томах // Физическое образование в вузах, 2009. Т. 15. - №2. – С. 3-10.
146. Смык А.Ф. Луи де Бройль и история физики XX века // История науки и техники, 2011. - №5. - С. 26-38.
147. Смык А.Ф. Взгляды Луи де Бройля на преподавание физики // Физическое образование в вузах, 2011. - Т. 17. - №4. – С. 72-77.
148. Смык А.Ф. Доклад Луи де Бройля «новая динамика кванта» на V Сольвеевском конгрессе // История науки и техники, 2011. - №10. - С. 8-23.
149. Смык А.Ф. Генезис идеи корпускулярно-волнового дуализма Луи де Бройля // Вопросы истории естествознания и техники, 2012. - №2. - С. 22-42.
150. Смык А.Ф. Нематериальные волны материи де Бройля // Физическое образование в вузах, 2012. - Т. 18. - №4. – С. 19-29.
151. Смык А.Ф. Интервью с Ж.Лошаком: Воспоминания о великом учителе – Луи де Бройле // История науки и техники, 2012. - №4. - С. 8-11.
152. Смык А.Ф. Интервью с Ж.Лошаком: Развивая идеи великого учителя – Луи де Бройля // Инженерная физика, 2012. - №1. - С. 3-4.
153. Смык А.Ф. Луи де Бройль и история ранних Сольвеевских конгрессов // Всеобщая история, 2012. - №1. - С. 72-85.
154. Смык А.Ф. Знаменитая и неизвестная диссертация Луи де Бройля // История науки и техники, 2013. - №4. - С. 15-27.
155. Смык А.Ф. Поиск Луи де Бройлем физического смысла корпускулярно-волнового дуализма // Вестник РУДН, 2013. - №2. - С. 3-13.
156. Старосельская-Никитина О.А. Поль Ланжевен. - М.: Физматгиз. - 1959. - 317 с.
157. Старосельская-Никитина О.А. Из истории международных Сольвеевских конгрессов по физике 1911-1933 // Труды ИИЕиТ АН СССР, 1960. - Т. 34. - С. 9-63.
158. Степин В.С. Квантово-релятивистская физика как неклассический тип рациональности // 100 лет квантовой теории. История.Физика. Философия. – М.: НИА-Природа, 2002. - С. 10-23.
159. Суворов С.Г. Вклад де Бройля в развитие физики // УФН, 1976. - Т. 93. - В. 1. - С. 177.
160. Тамм И.Е. Новые принципы статистической механики Бозе-Эйнштейна в связи с вопросом о физической природе материи // УФН, 1926. - Т. 6. - В. 2. - С. 112-141.
161. Тоннела М.-А. Основы электромагнетизма и теории относительности. - М.: ИЛ, 1962. - 483 с.

162. Тартаковский П.С. Затруднения теории квантов до «новой квантовой механики» / Основания новой квантовой механики: Сборник статей / Под ред. и с предисл. акад. А.Ф. Иоффе. - М.; Л.: Гос. изд-во, 1927. - 127 с.
163. Тартаковский П.С. Волновые взгляды на природу материи и опыт // УФН, 1928. - Т. VII. - В. 3. - С. 338-360.
164. Тартаковский П.С. Экспериментальные основания волновой теории материи. - Л.; М.: ГТТИ, 1932. - 152 с.
165. Томсон Г.П. Ранний этап изучения дифракции электронов // УФН, 1969. - Т. 99. - В. 3. - С. 455-468.
166. Тригг Дж. Решающие эксперименты в современной физике. - М.: Мир, 1974. - 160 с.
167. Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. - 512 с.
168. Фок В.А. начала квантовой механики. 2-е изд. М.: Наука, 1976. - 376 с.
169. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // УФН, 1957. - Т. 62. - В. 8. - С. 461-474.
170. Финкельштейн А.М., Ноздрачев А.Д., Поляков Е.Л., Зеленин К.Н. Нобелевские премии по физике 1901-2004. Т. 1. - СПб.: Гуманистика, 2005. - 616 с.
171. Флерова М.Н. Дифракция молекуллярных лучей от кристаллов // УФН, 1935. - Т. 15. - В. 5. - С. 614-649.
172. Франк Ф. Материя как волновое движение // БСЭ, 1928. - Т. 12. - С. 753-754.
173. Френель О. Мемуар о дифракции света, удостоенный премии Академии наук / Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. - М.: Высш. шк., 1989. - С. 297-306.
174. Френк А.М., Спасский Б.И. Из истории оптики в XVII веке (к оптике Гюйгенса) // История и методология естественных наук. - М.: МГУ. - 1965. - В. 3. Физика. - С. 192-197.
175. Френкель Я.И. Волновая механика. В 2 ч. Ч. 1. - Л.; М.: Гос. технико-теорет. изд-во, 1933. - 386 с.
176. Френкель Я.И. Опыт теории световых квантов // УФН, 1924. - Т. IV. - В. 4. - С. 329-333.
177. Френкель Я.И. На заре новой физики. - М.: Наука, 1969. - 384 с.
178. Френкель Я.И. Корпускулярный аспект материи // УФН, 1951. - Т. 44 - В. 5. - С. 110-116.
179. Френкель В.Я. Юрий Александрович Крутков // УФН, 1970. - Т. 102. - В. 12. - С. 639-654.
180. Френкель В.Я. Пауль Эренфест – ученый и человек // УФН, 1969. - Т.98. - В. 3. - С. 537-568.
181. Френкель В.Я. Яков Ильич Френкель. - М.: Наука, 1966. – 473 с.
182. Хунд Ф. История квантовой теории. - Киев: Наукова думка, 1980. - 244 с.
183. Хоффман Д. Эрвин Шредингер. – М.: Мир, 1987. - 95 с.
184. Хвольсон О.Д. Физика наших дней. Новые понятия современной физики в общедоступном изложении. - М.-Л.: Гос. Изд-во, 1928. - 344 с.
185. Храмов Ю.А. Научные школы в физике. Препринт ИТФ-79-63Р. – Киев: Инст. теор. физики АН УкрССР, 1979. - 73 с.
186. Шапошников К. Новый принцип динамики световых квантов // Ж.Р.Ф.-Х.О, 1927. – Т. 59. - В. 1. - С. 109-112.
187. Шредингер Э. Об одном замечательном свойстве квантовых траекторий электрона / Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - С. 161-171.

188. Шредингер Э. К Эйнштейновской теории газа / Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - С. 172-182.
189. Шредингер Э. Волновая теория механики атомов и молекул / Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - С. 183-203.
190. Шредингер Э. Новые пути в физике. - М.: Наука, 1971. - 428 с.
191. Шредингер Э. Квантование как задача о собственных значениях / Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - С. 9-50.
192. Шредингер Э. Избранные труды по квантовой механике. - М.: Наука, 1976. - 424 с.
193. Шушурин С.Ф. Создание основ волновой механики Л. де Броイлем / 50 лет квантовой механики. - М.: Наука, 1979. - С. 78-81.
194. Шпольский Э. Рецензия на книгу А.Зоммерфельда «Строение атома и спектры» // УФН, 1929. - Т. IX. - В. 4. - С. 539-540.
195. Эренфест П. Относительность. Кванты. Статистика. - М.: Наука, 1972. - 355 с.
196. Эйнштейн А. По поводу книги Эмиля Мейерсона «Релятивистская дедукция» // А. Эйнштейн. Собрание научных трудов. Т. IV. - М.: Наука, 1967. - С. 98-103.
197. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. Развитие идей от первоначальных понятий до теории относительности и квантов. Пер. с англ. С.Г. Суворова. - М.: Наука, 1965. - 327 с.
198. Эйнштейн А. Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 92-107.
199. Эйнштейн А. Новое определение размеров молекул / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 75-91.
200. Эйнштейн А. Эксперимент Комптона. Существует ли наука ради самой науки? / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 464-467.
201. Эйнштейн А. К теории возникновения и поглощения света / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 128-133.
202. Эйнштейн А. К современному состоянию проблемы излучения / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 164-179.
203. Эйнштейн А. О развитии наших взглядов на сущность и структуру излучения / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 181-195.
204. Эйнштейн А. Теория квантов света и проблема локализации электромагнитной энергии / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 237-239.
205. Эйнштейн А. К квантовой теории излучения / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 393-406.
206. Эйнштейн А. К квантовой теории идеального газа / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 503-511.
207. Эйнштейн А. Квантовая теория одноатомного идеального газа / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 481-488.
208. Эйнштейн А. Теоретические и экспериментальные соображения к вопросу о возникновении света / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 525-527.
209. Эйнштейн А. Квантовая теория одноатомного идеального газа: Второе сообщение / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 489-502.
210. Эйнштейн А. Вводные замечания об основных понятиях / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 3. - М.: Наука, 1966. - С. 623-626.
211. Эйнштейн А. Предисловие к книге Луи де Броиля «Физика и микрофизика» / Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 4. - М.: Наука, 1967. - С. 349-350.

212. Эйнштейновский сборник 1969-1970. Отв. ред. И.Е. Тамм, Т.И. Наан. – М.: Наука, 1970. - 409 с.
213. Эйнштейновский сборник 1974. Отв. ред. В.Л. Гинзбург, Т.И. Наан. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
214. Юкава Х. Лекции по физике. - М.: Энергоиздат, 1981. - 128 с.
215. Юнг Т. Теория света и цветов / Творцы физической оптики. - М.: Наука, 1973. - С. 115-121.
216. Anderson W. A consequence of the theory of M. Louis de Broglie // Phil. Mag., Series 6, 1924. - V. 47. - P. 446.
217. Archives de l'Academie des Sciences. 42J-Fonds Louis de Broglie. - Paris, 1990.
218. Abragam A. Louis Victor Pierre Raymond de Broglie // Biographical memoirs of fellows of the royal society, 1988. - V. 34. - P. 22-41.
219. Bacciagaluppi G., Valentiny A. Quantum theory at the crossroads. Reconsidering the 1927 Solvay conference - Cambridge:Cambridge University Press, 2009. - 530 p.
220. Bohr, N., Kramers, H.A., Slater, J.C. The quantum theory of radiation // Philosophical Magazine, 1924. - 47. - P. 785-802.
221. Boya L.J. Rejection of the light quantum: the dark side of Niels Bohr // International Journal of theoretical physics – 2003. - V. 42. - N.10. – P. 2563-2573.
222. Bohm D. On the creation of a deeper insight into what may underlie quantum physical law / Quantum mechanics, determinism, causality, and particles. An international collection of contributions on honor of Louis de Broglie on the occasion of the jubilee of his celebrated thesis. - Dordrecht: Reidel, 1976. - P. 1-10.
223. Bohm D., Hiley B.J. The de Broglie pilot wave theory and the further development of new insights arising out of it // Foundations of Physics, 1983. - V. 12. - N.10. - P. 1001-1016.
224. Bonk T. Why has de Broglie's theory been rejected // Studies in the History and Philosophy of Science, 1994. - V. 25. - P. 191-209.
225. Born M., Biem W. Dualism in quantum theory / Physics today, 1968. V. 21. N8. - P. 51-55.
226. Bragg W.H. X-ray and crystals // Nature, 1912. - V. 90. - P. 360-361.
227. Brush S.G. How ideas became knowledge: The light-quantum hypothesis 1905-1935 // Historical studies in the physical and biological sciences. – 2007. - V. 37. - N.2. - P. 205-246.
228. Broglie M., de. Les premiers congrès de physique Solvay. Et l'orientation de la physique depuis 1911. - Paris: Albin Michel, 1934. - 123 p.
229. Broglie M., de. La jeunesse et les orientations intellectuelles de Louis de Broglie / Louis de Broglie. Physicien et penseur. Ed. A. George. – Paris: Albin Michel, 1953. - P. 423-429.
230. Broglie M., de. La relation  $hv = E$  dans les phénomènes photoélectriques / Atomes et électrons. - Paris: Gauthier-Villars, 1923. - P. 80-100.
231. Broglie M., de. Les rayons X. - Paris: Blanchard, 1922. - 120 p.
232. Broglie L., de. Savants et Découverts. - Paris: Albin Michel, 1951. - 301 p.
233. Broglie L., de. Continu et discontinu en physique modern. – Paris: Albin Michel, 1941. – 260 p.
234. Broglie L., de. Déduction et induction dans la recherche scientifique // Annales de la Fondation Louis de Broglie, 1991. - V. 16. - N.3. - P. 277-280.
235. Broglie L., de. A Tentative Theory of Light Quanta // Phil. Mag., 1924. - V. 47. - P. 446-466.
236. Broglie L., de. De Broglie's theory of the quantum and Doppler principle // Nature, 1924. - V. 114. - N. 2854. - P. 51-52.

237. Broglie L., de., Dauvillier A. Semi-optical lines in the X-ray spectra. To the editors of the Philosophical Magazine // Phil. Mag., 1925. Series 6. - V. 49. - P. 752-753.
238. Broglie L., de. Rayonnement noir et quanta de lumière // Journal de physique, 1922. - V. 3. - P. 422-428.
239. Broglie L., de. L'enseignement de la physique // Rev. metralogie pratique et legale, 1949. - V. 27. - N.5. - P. 29-35.
240. Broglie L., de. Les principes de la nouvelle mécanique ondulatoire // Journal de Physique. 1926. Serie VI. - T. VII. - P. 321-337.
241. Broglie L., de. Le dualism des ondes et des corpuscules dans l'oeuvre de Albert Einstein / Lecture faite en la séance annuelle des prix du 5 décembre 1955, Institut de France, Académie des Sciences. - 35 p.
242. Broglie L., de. Recherches sur la theorie des quanta // Annales de Physique, 1925. - V. 3. - N.10. - P. 22-128.
243. Broglie L., de. Notice sur les travaux scientifiques. - Paris: Hermann, 1931. - 41 p.
244. Broglie L. de. Une nouvelle conception de la lumiere. - Paris: Hermann, 1934.
245. Broglie L. de. Nouvelles recherché sur la lumiere. - Paris: Hermann, 1936.
246. Broglie L. de. .Une nouvelle theorie de la lumiere, la mecanique ondulatoire du photon. T. I et T. II. - Paris: Hermann, 1940, 1942.
247. Broglie L. de. Theorie generale des particules a spin. - Paris: Gauthier-Villars, 1943.
248. Broglie L. de. Ondes electromagnetique. - Paris: Gauthier-Villars, 1967.
249. Brown H.R., Martins R.A. De Broglie's relativistic phase waves and wave groups // Am. J. Phys., 1984. - V. 52. - N.12. - P. 1130-1140.
250. Brillouin M. Actions mecaniques à hérédité discontinue par propagation; essai de théorie dynamique de l'atome à quanta // Comptes Rendus., 168. - 1919. - P. 1318.
251. Cline B.L. Men who made a new physics: physics and the quantum theory. - Chicago: University of Chicago Press, 1987. - 275 p.
252. Compton A.H. The degradation of gamma-ray energy // Philosophical Magazine, 1921. - V. 41. - P. 749-769.
253. Compton A.H. Secondary radiations produced by X-rays and some of their applications to physical problems // Bulletin of the National Research Council, 1922. V. 4 (part 2). N.20.
254. Compton A.H. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements // Phys. Rev. - 1923. - V. 22. - P. 483-502.
255. Compton A.H. The scattering of x-rays as particles // American Journal of Physics, 1961. - V. 29. - P. 817-820.
256. Comtesse J. de Pange (Pauline de Broglie). Comment j'ai vu 1900. V. 1. V. 2. - Paris: Grasset, 1965.
257. Coster D., Hevesy G. On the missing element of atomic number 72 // Nature, 1923. - V. 11. - P. 79-81.
258. Cushing, J.T. Quantum mechanics: historical contingency and the Copenhagen hegemony. - Chicago: University of Chicago Press, 1994. - 328 p.
259. Davisson C., Kunzman C.H. Scattering of electrons by nickel // Science, 1921. - N.54. - P. 522-524.
260. Davisson C., Kunzman C.H. Scattering of low speed electrons by platinum and magnesium // Phys. Rev., 1923. - V. 22. - P. 242-258.
261. Davisson C., Germer L.H. Scattering of electrons by crystal of nickel // Nature, 1927. - V. 119. - P. 558-560.
262. Davisson C., Germer L.H. Diffraction of electrons // Phys. Rev., 1927. - V. 30. - P. 705-740.
263. Darrigol O. The origin of quantized matter waves // Historical studies in the physical and biological sciences, 1986. - V. 16. - N.2. - P. 197-253.

264. Darrigol O. Strangeness and soundness in Louis de Broglie's early works // *Physis*, 1993, 30. - P. 303-333.
265. Dauvillier A. Hommage à M. Louis de Broglie / Louis de Broglie. Physicien et penseur. Ed. A. George. – Paris: Albin Michel, 1953. - P. 171-174.
266. Duane W. The transfer in quanta of radiation momentum in matter // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.*, 1923. – V. 9. - P. 153-156.
267. Duane W. An application of certain quantum laws to the analysis of crystals // *Phys. Rev.* 1925. - V. 25. - P. 881-885.
268. Einstein, letter to Konrad Habicht 18 or 25 May 1905 / Collected papers of Albert Einstein. Ed. M.J. Klein, A.J. Kox, R. Schulmann-Princeton, 1993. – P. 31.
269. Espinosa J.M. Physical properties of de Broglie's phase waves // *Am. J. Phys.*, 1982. – V. 50. - N.4. - P. 357- 362.
270. Elsasser W. Bemerkungen zur Quantenmechanik freier Elektronen // *Naturwissenschaften*, 1925. - V. 13. – P. 711-719.
271. Estermann I., Stern O. Beugung von molekularstrahlen (bending of molecular rays) // *Zeits.Physik*, 1930. - V. 61. - P. 95.
272. Feuer L.J. Einstein and the generations of science. - N.Y.: Basic book inc. Publishers, 1974. - 272 p.
273. Forman P. Weimar culture, causality and quantum theory 1918-1927 // HSPS, 1971. V. 3. - P. 1-116.
274. German P. Louis de Broglie ou la passion de la «vraie» physique // *C.R.*, 1987. – N.4.-N.6. - P. 569-593.
275. Gamow G. Thirty years that shook physics: the story of quantum theory. - N.Y.: Doubleday, 1966. - 225 p.
276. Gehrenbeck R.K. Electron diffraction: fifty years ago // *Physics today*, January 1978. - P. 34-41.
277. Hanle P.A. Erwin Schrödinger's reaction to Louis de Broglie's thesis on quantum theory // *Isis*, 1977. - V. 68. - N.4. - P. 606-609.
278. Hanle P.A. The coming of age of Erwin Schrödinger: his quantum statistics of ideal gases // *Arch. for history of exact sciences*, 1977. - V. 17. - N.2. - P. 165-192.
279. Hanle P.A. The Schrödinger-Einstein correspondence and the sources of wave mechanics // *American Journal of physics*, 1979. - V. 47. - N.7. - P. 644-648.
280. Hughes A.L. On the emission velocities of photoelectrons // *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1912. V. 212. - P. 205-206.
281. Hanson N.R. The concept of the positron. – Cambridge: Cambridge University Press, 1963. - 236 p.
282. Holton G. The roots of complementarity // *Daedalus. Journal of the American Acad. of Arts and Sciences*, 1970. - V. 99. - N.4. - P. 1015-1055.
283. Joas C., Lehner C. The classical roots of wave mechanics: Schrodinger's transformation of the optical-mechanical analogy // *Studies in history and philosophy of modern physics*, 2009.
284. Kubli F. Louis de Broglie und die Entdeckung der Materiewellen. - Wurzburg, 1970. – 68 p.
285. Kubli F. Un entretien Louis de Broglie // *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 1992. V. 17. - №2. - P. 111-134.
286. Landè A., Born M., Biem W. Dialogue on dualism / *Physics today*, 1968. V. 21. N.8. - P. 55-56.
287. Landè A. From dualism to unity in quantum physics. – London: Cambridge Univ. Press, 1960. – 114 p.
288. Landè A. New foundations of quantum mechanics. – London: Cambridge Univ. Press, 1965. – 170 p.

289. Landè A. Quantum fact and fiction // Am. J. Phys., 1965. - V. 33. - P. 123-127.
290. Langevin J. Cahiers Fundamenta Scientiae 1979, N.93.
291. Louis de Broglie. Physicien et penseur / Ed. A. George. – Paris: Albin Michel, 1953. - 497 p.
292. Lochak G. De Broglie's initial conception of de Broglie waves // The wave-particle dualism. Dordrecht: Kluwer academic publishes, 1984. - 557 p.
293. Lochak G. Voyage au centre de la science au XX e siècle. Sur les traces de Louis de Broglie. - Paris: Hermann, 2008. - 237 p.
294. Lochak G. De Broglie's initial conception of de Broglie waves / The wave-particle dualism. A tribute to Louis de Broglie on his 90th birthday. - Dordrecht: Kluwer academic publishes, 1982. - P. 1- 26.
295. Lochak G. Thesis of which L. de Broglie was referee // Annales de la Fondation Louis de Broglie, 1992. - V. 17. - N.3. - P. 257-273.
296. La théorie du rayonnement et les quanta. Rapports et discussions de la reunion tenue à Bruxelles, 1911 / Ed. P. Langevin, M. de Broglie. - Paris: Gauthier-Villars, 1912. - 362 p.
297. Luo J. et al. New experimental limit of the photon rest mass with rotating torsion balance // Phys. Rev. Letters, 2003. - V. 90. - P. 081801-4.
298. Lewis G.N. The conservations of photon // Nature, 1926. - V. 118. - P. 874-875.
299. Laloë F. Do we really understand quantum mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems // Am. J. Phys., 2001. - V. 69. - N.6. - P. 655-701.
300. Madelung E. Quantumtheorie in hydrodynamische form // Zts. f. phys., 1926. - 40. - P. 322-326.
301. MacKinnon E. De Broglie's thesis: a critical retrospective // American Journal of Physics, 1976. - V. 44. - N.44. - P. 1047-1055.
302. MacKinnon E. Scientific explanation and atomic physics. - Chicago: Chicago University Press, 1982. - 450 p.
303. Moore W.J. A life of Erwin Schrödinger. – Cambridge: Cambridge University Press, 1994. - 364 p.
304. Moon R.J. The gifts of Louis de Broglie to science // Journal of Fusion Energy, 1985. - V. 3. - N.2. - P. 30-35.
305. Medicus H.A. Fifty years of matter waves // Physics today, February 1974. - P. 38-45.
306. Mehra J. The Golden age of theoretical physics. V. 1, V. 2. - London: World Scientific, 2001. - V. 1. - P. 1- 638. V. 2. - P. 639-1408.
307. Meyerson E. Essais. – Paris: J. Vrin, 1936. - 272 p.
308. Millonni P.W. Wave-particle duality of light: a current perspective / The wave-particle dualism. A tribute to Louis de Broglie on his 90<sup>th</sup> birthday. - Dordrecht: Kluwer academic publishes, 1982. - P. 27-68.
309. Millikan R.A. Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force // Phys. Rev., 1916. - V. 7. - N.1. - P. 18-32.
310. Nye M.J. Aristocratic culture and the pursuit of science: the de Broglies in modern France // Isis, 1977. - V. 88. - N.3. - P. 397-421.
311. Osche G.R. Electron channeling resonance and de Broglie's internal clock // Annales de la Fondation Louis de Broglie, 2011. - V. 36. - P. 61-71.
312. Pais A. Einstein and the quantum theory // Reviews of modern physics, 1979. - V. 51. - N.4. - P. 863-914.
313. Pais A. Niels Bohr times. - Oxford: Oxford University Press, 1991. - 230 p.
314. Pais A. Subtle is the Lord: the science and the life of Albert Einstein. - Oxford: Oxford University Press, 1982. - 559 p.
315. Popper K. A critical note on the greatest days of quantum theory / Quantum, space and time. The quest continues studies and essays in honour of Louis de Broglie, Paul Dirac, Eugene Wigner. - Cambridge: Cambridge University Press, 1982. - P. 49-54.

316. Quantum mechanics, determinism, causality, and particles. An international collection of contributions on honor of Louis de Broglie on the occasion of the jubilee of his celebrated thesis. - Dordrecht: Reidel, 1976. – 250 p.
317. Quantum, space and time. The quest continues studies and essays in honour of Louis de Broglie, Paul Dirac, Eugene Wigner. - Cambridge: Cambridge University Press, 1982. - 669 p.
318. Quantum mechanics, a half century later. A papers of a colloquium on fifty years of quantum mechanics. - Dordrecht: Reidel, 1974. - 312 p.
319. Quantum mechanics at the crossroads. Ed. J. Evans, A.S. Thorndike. – Berlin: Springer, 2006. - 265 p.
320. Raman V.V., Forman P. Why was it Schrödinger who developed de Broglie's ideas? // Historical studies in the physical and biological sciences, 1969. - V. 1. - P. 291-314.
321. Richardson O.W., Compton K.T. The photoelectric effect // Philosophical Magazine, 1912. - V. 24. – P. 579-594.
322. Schlegel R. Louis de Broglie's thesis // Am. J. Phys., 1977. V. 45. - N.9. – P. 871-872.
323. Schrödinger E. Dopplerprinzip und Bohrsche Frequenzbedingung // Physikalische Zeitschrift, 1922. - Bd. 23. - S. 301-303.
324. Scott W.T. Erwin Schrödinger. An introduction of his writings. – Massachusetts: University of Massachusetts Press, 1967. - 179 p.
325. Thomson G.P., Reid A. Diffraction of cathode rays by a thin film // Nature, 1927. - V. 119. - P. 890.
326. Thomson G.P. The waves of an electron // Nature, 1928. - V. 122. - P. 279-282.
327. Thomson J.J. Conduction of electricity through gases. - Cambridge: Cambridge University Press, 1903. - P. 258.
328. Wagener P. Resolving inconsistencies in de Broglie's relation // Progress in physics, 2010. - V. 1. – P. 15-18.
329. Weinberger P. Revisiting Louis de Broglie's famous 1924 paper in the Philosophical Magazine // Philosophical Magazine Letters, 2006. - V. 86. – N.7. - P. 405-410.
330. Wheaton B.R. The Tiger and the Shark: empirical roots of wave-particle dualism. - Cambridge: Cambridge University Press, 1983. - 313 p.
331. Wheaton B.R. Atomic waves in private practice / Quantum mechanics at the crossroads. Ed. J. Evans, A.S. Thorndike. – Berlin: Springer, 2006. – P. 31-72.
332. Wilson W. Maurice, Le Duc de Broglie // Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society, 1961. - V. 7. - P. 31-36.

Научное издание

**СМЫК** Александра Федоровна

ОТ ВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ  
К КВАНТОВОЙ МЕХАНИКЕ

монография

*Редактор* В.В. Виноградова

Подписано в печать 19.04.2013 г. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 14,5. Уч.-изд. л. 11,6. Тираж 50 экз. Заказ .  
Ротапринт МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, 64.