

П.С. Тартаковский

**Экспериментальные основания волновой
теории материи**

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
П11

П11 **П.С. Тартаковский**
Экспериментальные основания волновой теории материи / П.С. Тартаковский – М.: Книга по Требованию, 2020. – 152 с.
ISBN 978-5-458-57834-9

ISBN 978-5-458-57834-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2020
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2020

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ ДЕ БРОЙЛЯ И ШРЕДИНГЕРА.

Кризис атомистики, наметившийся к концу первой четверти XX в., выразился в невозможности рассматривать внутриматериальные явления, явления, непосредственно обусловленные мельчайшими частицами материи — электронами и протонами, пользуясь методами и образами старой физики, хотя бы и дополненными постулатами теории квантов.

Выход из этого кризиса наметился с появлением квантовой механики, которая сперва развивалась в виде так называемой волновой механики де Броиля и Шредингера, а также новой квантовой механики Гейзенберга.

Эти теории, используя совершенно новые представления о материи, применили и новый математический аппарат к разрешению задач атомистики и пришли к весьма существенным результатам, объяснив те явления, которые уже были известны и ждали правильного теоретического истолкования, и предсказав ряд новых явлений.

Бурное развитие новых теорий, связанных с именами де Броиля, Шредингера, Гейзенберга, Борна, Дирака и других, не могло не отразиться и на экспериментальной физике. Был выдвинут целый ряд новых задач, связанных с новыми взглядами на природу материи.

Обратили внимание на то, что в некоторых случаях материальные частицы — электроны ведут себя совсем особым образом, непонятным с точки зрения прежних воззрений. Новые явления стали предметом изучения для многих экспериментаторов и в настоящее время имеем уже довольно богатый экспериментальный материал в этой области нашей науки. Обзору этой области экспериментальной физики и посвящена настоящая книга.

Главную руководящую нить в этих экспериментах дает теория де Броиля, основные положения которой мы сейчас и изложим.

Физика XIX в. резко противопоставляла материю, из которой состоит весь окружающий нас внешний мир, и свет, испускаемый

этой материей и дающий нам наиболее полные и ценные сведения о материи. Атомизм древних материалистов в наше время принял новые формы, соответствующие развитию экспериментальной науки, и сделался господствующей идеей в наших воззрениях на материю. К концу XIX в. атомизм перестал быть гипотезой. Атомное строение материи сделалось прочным опытным фактом. Дальнейшее изучение атомов и молекул привело к выяснению сложности их структуры, выяснило, что они состоят из более мелких элементарных частиц — электронов, несущих отрицательный, и протонов, несущих положительный заряд. Таким образом *материя состоит из первичных частиц, характеризуемых определенными значениями энергии, скорости (количества движения) и массы (выяснилась еще необходимость приписать элементарным частицам магнитный момент)*. Масса, впрочем, согласно теории относительности не постоянна, а зависит от скорости.

Типичным для материи свойством является дискретность частиц ее составляющих.

В противоположность этому физика XIX в. рассматривает свет как явление волновое. Ряд фактов, открытых в течение XVIII в. (интерференция, дифракция света и т. п.) заставили отказаться от Ньютоновой теории истечения и утвердили волновую теорию света. При этом сначала свет рассматривался как волны в особой упругой среде — эфире, затем была открыта связь между явлениями световыми и электромагнитными и создалась электромагнитная теория света Максвелла. Но и в новой теории за светом, как электромагнитными волнами, сохранилось прежнее типичное свойство — непрерывность: световые волны распространяются в пространстве непрерывным образом.

Однако явления, открытые в самом конце XIX и начале XX в. привели к тому, что резкость этого противопоставления света и материи — воли и частиц — стала стираться. Явления, связанные с поглощением и испусканием света (фотоэффект, фотохимические реакции, черное излучение и т. п.), привели к необходимости введения прерывности в представления о свете. В 1905 г. создалось учение о квантах света (теперь их называют фотонами), согласно которому свет состоит из частиц, имеющих энергию, количество движения, массу (Эйнштейн). От частиц обычной материи они отличаются тем, что их покоящаяся масса равна нулю — остановившись, они уничтожаются. Таким образом начала создаваться далеко идущая аналогия между материей и светом. Эта точка зрения, как известно, особенно четко подтвердилась с открытием эффекта Комптона (1923 г.).

Эта аналогия света и материи не исключила, однако, из учения о свете тех представлений и величин, которые связаны с его волновой природой. Новая теория не поглотила старую, как это обычно бывало в науке: от всякой новой теории требовали, чтобы она, объясняя новые факты, в то же время содержала в себе и трактовку старых фактов. В данном случае учение о квантах света лишь с натяжкой позволяло объяснить некоторые факты волновой оптики (например, дифракцию). Таким образом, наряду с новым представлением о световых квантах пришлось сохранять для описания ряда явлений старые образы волн. Создался в области учения о свете своего рода дуализм, который сейчас часто называют дуализмом волн и частиц. Противопоставление света и материи смягчилось благодаря тому, что в учение о свете вошла идея атомизма, идея частиц, столь характерная для материи. Но уже в характеристики света, как частиц, вошли величины хорошо знакомые нам из учения о волнах — мы имеем в виду частоту и длину волны. В самом деле, энергия, количество движения и масса фотона определяются, как известно, формулами:

$$E = h\nu, \quad g = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}, \quad m = \frac{h\nu}{c^2}, \quad (1)$$

где ν — частота, λ — длина волны и h — постоянная Планка ($6,55 \cdot 10^{-27}$ эрг. сек.). Если бы мы захотели полностью отказаться от волновых свойств света, нам были бы совершенно непонятны соотношения (1) — в них фигурируют величины, не имеющие смысла в корпускулярной теории света. Величины, стоящие в правой части равенств, определяются из опытов, которые мы считаем типичными для света, как волнового явления (интерференция, дифракция).

Стремление объединить обе точки зрения, исключавшие, казалось, друг друга, привело Луи де Бройля к теории, которой суждено было сыграть решающую роль в смягчении противоречия частиц и волн не только в области учения о свете, но и в учении о материи.

Представим себе частицу материи массы m . Согласно теории относительности мы приписываем этой частице энергию $E = mc^2$ и количество движения $g = mv$. Масса же m выражается формулой $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Здесь v — скорость частицы, c — скорость

света и m_0 — покоящаяся масса частицы. В случае фотонов эти величины связаны с величинами, характеризующими световые волны, формулами (1). Аналогия частиц материи и световых частиц

позволила де Бройлю высказать допущение, что со всякой частичей связан периодический процесс определенной частоты ν ; при движении частицы мы воспринимаем этот периодический процесс как волну. Как мы увидим, к этому приводят соображения теории относительности. Естественно сопоставить для всех частиц механические величины — энергию и количество движения — с волновыми так, как это делает теория световых квантов. Отсюда основные соотношения теории де Бройля:

$$E = mc^2 = h\nu, \quad m\nu = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

Для частоты и длины волн, связанных с частицей материи, мы получаем соотношения:

$$\nu = \frac{mc^2}{h} \quad \text{и} \quad \lambda = \frac{h}{m\nu} \quad (3)$$

Если частица движется настолько медленно, что можно пренебречь поправкой на изменчивость массы по теории относительности, в эти формулы вместо m вставляют просто m_0 (покоящуюся массу). Для быстрых частиц

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

и

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad \lambda = \frac{h}{m_0 \nu} \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4)$$

Из уравнений (3) мы можем определить и скорость распространения наших волн материи w . В самом деле, общая теория волн связывает длину волны, частоту и скорость распространения волн соотношением $w = \nu\lambda$ (для световых волн мы имеем $c = \nu\lambda$). Это дает в связи с формулами (2):

$$w = \frac{c^2}{v}. \quad (5)$$

Эта скорость всегда больше скорости света c , так как согласно теории относительности скорость частицы v всегда меньше c . Таким образом, эти волны всегда опережают частицу.¹

¹ Праведем более убедительный аналитический вывод того, что периодический процесс, связанный с движущейся частицей, представляет волну со скоростью w . Периодический процесс представим некоторой функцией, напр. $\psi = A \sin 2\pi\nu_0 t$. Если частица движется со

Несмотря на это, они органически связаны с частицей, предопределяя ее движение. Одним из основных выводов теории де Бройля является то, что так называемая *групповая скорость* этих волн, с которой связано распространение энергии, оказывается равной *скорости частицы* v . Этот результат легко получить, пользуясь выражением групповой скорости, как ее дает общая теория волн:

$$\bar{w} = \frac{d v}{d \left(\frac{1}{\lambda} \right)},$$

и подставляя значения величин для волны материи.

Законы общей теории волны определяют распространение волны материи, а с ним и движение потока частиц, связанных с этими волнами. Поэтому-то в ряде случаев поведение потока материальных частиц оказывается тождественным поведению волн: для описания этих явлений часто бывает достаточно пользоваться только образами волновой теории, забывая о корпускулярной природе материи.

Дуализм волн и фотонов в световых явлениях позволяет по аналогии сделать еще одно сопоставление между частицами и волнами материи. Интенсивность света (энергия) по волновой теории пропорциональна квадрату амплитуды волны; с другой стороны, интенсивность светового пучка пропорциональна числу фотонов, в нем несущихся.

скоростью v , то в системе координат, движущейся вместе с частицей (относительно этой системы частица покоятся), будем иметь $\psi = A \sin 2 \pi v_0 t'$. Время t' и движущейся системе связано со временем в покоящейся

системе преобразованием Лоренца: $t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Подставляя это значение для t' в выражение для функции ψ и полагая

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

получим:

$$\psi = A \sin 2 \pi v \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) = A \sin 2 \pi v \left(t - \frac{x}{w} \right).$$

Это выражение, как известно, представляет синусоидальную волну, распространяющуюся вдоль оси x со скоростью $w = \frac{c^2}{v}$. Частота волны определяется действительно формулой (3). Волна эта, как показывает де Бройль, находится в фазе с колебательным процессом частицы и потому носит название *фазовой*.

Мы можем заключить по аналогии, что число движущихся материальных частиц, например электронов, пропорционально квадрату амплитуды волн материи. Следовательно, если расчет какого-либо явления показывает, что в некоторой точке амплитуда волны равна нулю, мы можем заключить, переводя этот результат на язык частиц, что в эту точку вовсе не попадают частицы материи.

Мы видим, что противопоставление света и материи, как волн и частиц, теорией де Броиля еще более смягчается, можно сказать устраняется: и в случае обычной материи, как и в случае света, мы имеем дело с двойственностью, с дуализмом волн и частиц.

В дальнейшем развитии теории некоторые ученые до известной степени пытались вовсе вычеркнуть из своего рассмотрения частицы, описывая явления при помощи математического аппарата теории волни. Такова была одно время позиция даже и Шредингера (основанная на ошибке).

Ряд фактов экспериментальной физики говорит однако за невозможность полного устранения понятия частиц: с индивидуальным существованием частиц связаны, например, такие эксперименты, как счет частиц (электронов, α -частиц) счетчиком Гейгера или опыты с камерой Вильсона, позволяющей фотографировать пути отдельных частиц и т. д.

Мы изложим здесь очень кратко вывод основного уравнения квантовой механики — знаменитого волнового уравнения Шредингера.

Рассмотрение волнового процесса, связанного с движущейся частицей, какова бы ни была его истинная природа, не может ограничиться указанием частоты и длины волны. Следует написать и *волновое уравнение волн материи*. Теория волн дает следующее общее волновое уравнение:

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{w^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

Здесь ψ — «волновая функция», а $\nabla^2 \psi$ — сокращенное обозначение для $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$ («Лапласов оператор»). Для случая волн, распространяющихся вдоль оси X имеем:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{w^2} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0. \quad (7)$$

Мы будем рассматривать только тот случай, когда зависимость функции ψ от времени является чисто синусоидальной

(выражается через синус или косинус). Такую зависимость, как известно, удобнее всего записать в комплексной форме:

$$\psi = \psi_0 e^{2\pi i \nu t}, \quad (8)$$

где частота ν определяется из формулы (2). Из (8) находим:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -4\pi^2 \nu^2 \psi.$$

и

$$\nabla^2 \psi + \frac{4\pi^2 \nu^2}{w^2} \psi = 0$$

или

$$\nabla^2 \psi + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \psi = 0. \quad (9)$$

Но по (3),

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

а из равенства

$$\frac{1}{2} mv^2 = E - V \quad (10)$$

(кинетическая энергия равна разности полной энергии и потенциальной) получаем:

$$mv = \sqrt{2m(E - V)};$$

таким образом вместо (9) будем иметь:

$$\nabla^2 \psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0. \quad (11)$$

Это основное уравнение теории Шредингера, являющееся в настоящее время основой для рассмотрения всех явлений физики атома и электрона.¹ Здесь величина V является функцией координат. Функция ψ является функцией координат и времени, на которую естественно налагается требование конечности, непрерывности и однозначности для всех точек пространства. Тогда оказывается, что уравнение имеет решение только для выбранных значений E и удовлетворяется выбранными функциями ψ . Эти функции «распространяются» волновым образом.

¹ В ряде случаев приходится пользоваться не этим уравнением, а рядом его обобщений на случай быстрых движений, когда приходится учитывать поправки теории относительности, чем мы здесь пренебрегли; обобщениями уравнения Шредингера приходится пользоваться и в случае наличия магнитного поля или же для случая многих взаимодействующих частиц.

Решение любой задачи сводится к нахождению избранных «собственных» значений энергии E (иначе говоря, частоты) и соответствующих данной задаче собственных функций ψ . О движении частицы в обычном механическом смысле ничего не говорится; материю, в сущности, не приходится рассматривать состоящей из частиц, мы имеем чистую теорию волн материи, если добавим к (11) уравнение для потенциала. В этой теории заряд может принимать любые значения (это неверно, конечно). В этой стадии теории Шредингера частица в известном смысле слова размазана по всему пространству. Это представление связано с тем физическим толкованием, которое дает функции ψ Шредингер. Он считает, что величина $|\psi|^2$ или $\psi\bar{\psi}$ (произведение функции ψ на комплексно-сопряженную с ней величину) определяет плотность зарядов частиц, если умножить ее на элементарный заряд, и плотность масс, если умножить на массу как функцию координат. Для получения истинной квантовой теории необходимо волны материи подвергнуть квантованию, тогда получается, в частности, атомизм и кратность всякого заряда основному e .

Характернейшей чертой квантовой теории и является эта эквивалентность описания материи — или как волн или как частиц.

В связи с развитием новой квантовой механики Гейзенберга (названной так в отличие от «старой квантовой механики» Бора) была высказана иная, соответственно, точка зрения на физический смысл величины $|\psi|^2$. Согласно этой точке зрения, высказанной Борном, $|\psi|^2 = \psi\bar{\psi}$ представляет вероятность, которую частица, например, электрон, имеет находиться в данном месте, сама же частица рассматривается обычным образом. Таким образом, умножив $\psi\bar{\psi}$ на заряд e , мы получим не истинную плотность зарядов в данной точке, а лишь вероятное значение ее. Таким образом весь формальный аппарат уравнения Шредингера полностью сохраняется; при рассмотрении явлений мы говорим о материи, как волнах, длины волны $\lambda = \frac{h}{mv}$; но

в то же время полностью сохраняется и понятие частиц. Какова же истинная причина того, что материальные частицы ведут себя столь отличным от законов обычной механики образом? Ответ на этот вопрос дает важный принцип, введенный в науку Гейзенбергом и называемый обычно *принципом неопределенности*. Согласно этому принципу, желая описать поведение элементарных частиц материи в обычных образах пространства и времени, мы не можем пренебречь взаимодействием наблюдаемой частицы со средствами наблюдения, как это делала старая фи-

зника (последнее вполне возможно для тел макроскопических размеров). Благодаря этому при одновременном определении положения и скорости (или количества движения) частицы мы неизбежно делаем ошибки, которые не можем одновременно уменьшить произвольным образом. Эти ошибки (Δq и Δp) связаны условием:

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq h \quad (12)$$

Таким образом, уменьшая Δq , мы неизбежно увеличиваем Δp и наоборот.¹ Численный подсчет показывает, что это не имеет никакого значения для достаточно больших тел, но для тел, размеров атомных, ошибкой невозможно пренебречь. Последнее обстоятельство создает невозможность точного определения положения и скорости электрона в начальный момент времени, а следовательно и невозможность вполне достоверного предсказания последующего поведения электрона. Таким образом исключается возможность обычного механического описания движения электрона (следовательные положения и скорости, орбита и т. п.) и остается только указывать вероятное его поведение, оставляя поле действия для случая. Такое «вероятностное» описание явлений является характерным для современной атомной физики вообще и для теории Гейзенберга — Шредингера в частности. Оно оказывается необходимым дополнением дуализма волн и частиц, если мы только хотим описывать явления в образах пространства и времени и сохранить основные материалистические позиции, неразрывно связанные с атомизмом; а к последнему нас побуждает прежде всего опыт. Замечательно, что к соотношениям неопределенности иода (12) проще всего и можно подойти, начав описание частицы, как корпускулы, и учтя затем и волновой ее характер (или наоборот). Чисто корпускулярное или чисто волновое представление не было в этом смысле неопределенным.²

КРАТКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАССЕЯНИЮ ЭЛЕКТРОНОВ ДО ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ.

II

Противопоставление света и материи, как мы видели в предыдущей главе, сменилось, если можно так выразиться, параллелиз-

¹ По квантовой теории, вообще говоря, любая пара величин не может быть измерена одновременно с абсолютной точностью. Для парной соизмеримости должны быть выполнены специальные, вообще не имеющие места, условия.

² Обо всех этих вопросах см. В. Гейзенберг, Физические принципы квантовой теории, ГТИ, 1932.

жом света и материи: и в случае света, и в случае материи мы имеем двойственную корпускулярно-волновую природу. Поэтому при рассмотрении вопроса, в какой области явленный следует искать непосредственных проявлений волновой природы материи, вполне возможно пользоваться аналогиями из области световых явлений.

Квантовая природа света (корпускулярная) резко проявляется в случае взаимодействий света и материи, связанных с поглощением или испусканием световой энергии. Мы знаем, что самая теория квантов возникла при теоретическом истолковании явлений черного излучения, где основную роль играет поглощение и испускание света. Представление о квантах света, как частичках, было применено Эйнштейном прежде всего к истолкованию явлений фотоэлектрических, основой которых является поглощение света: энергия фотоэлектронов создается за счет энергии поглощенных фотонов. В фотохимических явлениях квантовая природа света также играет основную роль. Наконец, количество движения фотона особенно четко проявляется в явлении Комптона, представляющем особый вид рассечения света (рентгеновых лучей), с изменением энергии фотонов.

Явления, в которых проявляется волновая природа света, это преимущественно явления распространения. Однако, всякое наблюдение над светом связано с взаимодействием его с материей и в конечном счете с поглощением. Наблюдать распространение волн в пустом пространстве без взаимодействия с материей невозможно. Взаимодействия с материей, в которых не оказывается квантовая природа света, связаны с изменением направления распространения света, а также с пространственным перераспределением интенсивностей. Сюда относятся явления отражения, рассеяния (кроме некоторых отдельных случаев, когда оказывается квантовая природа), преломления, дифракции и т. п. Это все явления, изучение которых и послужило главной осевой для установления волновой теории. Во всех этих явлениях мы всегда имеем взаимодействие света и материи, причем это взаимодействие определяет распространение световых волн.

Проводя аналогию между волнами материи и волнами света, мы должны ожидать, что волновая природа материи должна проявиться в тех случаях, когда мы имеем изменение направления движения частиц материи или пространственное их перераспределение; при этом нас должны больше всего интересовать случаи, когда эти явления не связаны с изменением энергии частиц. Такого рода явления имеют место в области эксперимента, имеющей весьма существенное значение и подвергав-